

**ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕГАЗОВОГО  
МАССИВА ПОД ВЛИЯНИЕМ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

Розглянуто особливості зміни фільтраційних і дифузійних характеристик вуглегазового масиву під впливом гірничих робіт. Виходячи з відомих джерел про структурні зміни шаруватості товщі гірських порід, зроблена спроба оцінити рівень зміни пористості й проникності блочно-тріщинуватого середовища поблизу очисної виробки.

**CHANGING OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF COAL AND GAS  
MASSIF UNDER THE INFLUENCE OF DEVELOPMENT WORKING**

Some features of changes of filter and diffusive characteristics of coal and gas massif under the influence of mining have been considered in this work. Starting from well-known statements about the structural changes of layered thickness of mining racks the attempt to assess the level of holowness change and permeability of block-cracked medium near mining workings has been done.

Обеспечение производственной и экологической безопасности при отработке углегазовых месторождений является одной из актуальнейших проблем горнодобывающих регионов. Для решения ряда вопросов, связанных с миграцией флюидов в окружающем выработки горном массиве необходимы сведения о структурном строении угольных пластов и вмещающих их пород. Эта информация позволяет обосновать параметры технологических процессов дегазации угленосной толщи для обеспечения безопасности горных работ, добычи газобразных углеводородов и снижения выбросов в атмосферу парниковых газов, создать теоретические модели газовой динамики для разрабатываемых месторождений. В силу труднодоступности, особенно глубоких горизонтов, отсутствия достаточно информативных геофизических средств, в настоящее время этот вопрос изучен, по нашему мнению, не в полной мере и нуждается в дальнейшей проработке. Авторами поставлена задача, рассмотреть изменение физических свойств углегазового массива под влиянием очистных работ на основе компиляции собственных и полученных другими исследователями данных [1-7].

Обработка накопленных результатов наблюдений за трещинами в керновом материале показала следующее. В нетронутой очистными работами толще пород можно выделить слоевые трещины, торцовые и эндокливажные, а так же экзокливажные. При этом, чем выше прочность породы и мощность слоя, тем больше расстояние между трещинами. В угольных пластах наблюдаемое количество трещин значительно выше, чем во вмещающих их породах. Существенное влияние имеет текстура пород, при равной прочности и мощности слоя в слоистых алевролитах трещины встречаются гораздо чаще, чем в однородных песчаниках. В слоях прочного песчаника в нормальном к напластованию направлении расстояние между трещинами составляло 0,5...0,2 м, что в 6...10 раз меньше чем в плоскости напластования.

Прочные породы менее подвержены структурным изменениям, а угли и малопрочные породы имеют мелкокусковатую структуру, обусловленную интен-

сивной трещиноватостью и превращением слоев в совокупность отдельных кусков, окруженных мелкодисперсными частицами.

Картина трещиноватости пород в нетронутой очистными работами толще представляется следующим образом [8]. Слоевые, или трещины осадконакопления, простираются вдоль плоскостей напластования. Кливажные трещины имеют падение примерно нормальное к напластованию. Простирание эндокливажных трещин близко к меридиональному, экзокливажные - простираются параллельно направлению характерных для данного района тектонических нарушений. Торцовые трещины имеют также нормальное к напластованию падение, а простирание - перпендикулярно эндокливажу.

Расстояние между трещинами кливажа или торцовыми зависит от мощности и прочности слоев пород. Чем выше прочность и мощность слоя, тем больше расстояние между трещинами. В среднем оно составляет для углей 0,01...0,05 м, аргиллитов 0,02...0,8 м, алевролитов с глинистым или известняковым цементом, соответственно, 0,01...0,06 и 0,6...3 м, песчаников 0,2...2 м и более. Показатель трещиноватости (отношение расстояния между трещинами к мощности слоя) изменяется почти от 0 до 200. Этот показатель для разных пород обычно имеет среднее значение близкое к 2. Протяженность слоевых трещин изменяется от 10 до  $10^8$  м, всех остальных - до 1...10 м. Ширина раскрытия эндогенных трещин составляет  $10^{-5}$ ... $10^{-3}$  м, экзогенных -  $10^{-9}$ ... $10^{-6}$  м [7].

Трещины разбивают нетронутой очистными работами толщу пород на призматические блоки. Как следует из теории дискретных сред, на контактах блоков весьма вероятно увеличение действующих напряжений на 40...100 % и более от среднего уровня. Так на глубине около 1000 м, где средний уровень геостатических напряжений равен примерно 25 МПа, возможны концентрации напряжений до 40 МПа и более, что соизмеримо с прочностью большей части слагающих массив пород и заведомо больше прочности углей. Такой уровень напряжений приводит либо к дроблению блоков, либо к разрушению породы в местах точечных контактов с образованием мелких фракций. Наши визуальные наблюдения подтверждают эти предположения. На поверхности обнажений угольных пластов наблюдали сетку хаотических трещин, характерных для процесса дробления кусковой среды под нагрузкой.

При ведении горных работ изменяется уровень напряженного состояния массива, и в породах появляются так называемые трещины горного давления. Эти трещины оконтуривают горные выработки. Частота трещин горного давления по мере удаления от контура выработки уменьшается, т.е. они локализируются в некоторой зоне. Согласно многочисленным публикациям расстояние между трещинами давления  $l$  (м), в основном, зависит от глубины разработки  $H$  (м) и предела прочности пород почвы пласта на одноосное сжатие,  $R_{сж}$ , МПа.

Под влиянием горных работ увеличивается длина и изменяется ширина раскрытия ранее существовавших трещин кливажа. Наличие трещин и изменения их параметров в процессе отработки пласта существенно влияют на физико-механические свойства углегазового массива [9], особенно это касается его показателей, определяющих фильтрационные, сорбционные, диффузионные и эффузивные процессы.

В первом приближении картина трещиноватости пород представляется следующим образом (табл. 1).

Таким образом, анализ экспериментальных данных подтверждает представление о блочном характере нетронутого горными работами углегазового массива, при этом получены, в первом приближении, закономерности изменения трещиноватости под влиянием очистных работ.

Результаты анализа частоты и ширины раскрытия трещин позволяют утверждать, что не только в зонах геологических нарушений, но и на участках тектонической нарушенности нетронутого очистными работами углегазового массива миграция флюидов возможна в нормальном напластованию направлении.

Важной особенностью, характеризующей трещиноватый горный массив, является упорядоченность расположения оконтуренных трещинами блоков, что определяет минимальный объем образовавшихся пустот. По оценкам ряда исследователей [8, 10] увеличение объема блочной упорядоченной среды под действием горных работ, в среднем не превышает 3...5 %, максимальный коэффициент трещинной пустотности вблизи обнаженных поверхностей углей и пород составляет не более 0,20...0,25 [11]. Поэтому фильтрационные характеристики разрушенных трещинами пород и угля сравнительно невелики. В таких условиях следует ожидать преобладающей роли диффузия и эффузия газов.

Таблица 1 - Обобщенные характеристики трещиноватости породного массива в Донецко-Макеевском районе Донбасса

№ пп	Параметры трещин					Габариты блока, м	
	Тип (система)	Ориентация		Частота (густота), $\Gamma, \text{м}^{-1}$	Протя- женность, $l, \text{м}$		Ширина раскрытия $\delta, \text{м}$
		падение	простираение				
Существуют в нетронутом горными работами массиве							
1	Слоевые	По плоскости осадконакопления		0,3...30	1...10 и более	$10^{-8}...10^{-10}$	0,02...3
2	Эндокливаж	Нормаль- к напла- сто ванию	Вдоль мери- диана	0,3...50	0,05...10	$10^{-5}...10^{-3}$	
3	Торцовые		Вдоль парал- лели	0,3...50	0,05...10	$10^{-9}...10^{-6}$	
4	Экзокливаж	Параллельно плоскости основного тектонического нарушения		0,3...50	0,05...10	$10^{-9}...10^{-6}$	
Возникают под влиянием горных работ							
5	Трещины давления	60...90° к плоскости напластования пород	Параллельно границам горных работ (выработок)	2...200	$5 \cdot 10^{-3} ... 5 \cdot 10^{-2}$	$0...10^{-1}$	0,005..1
6	Дополнител. расслоение	Параллельно плоскости напластования пород		0,3...100	$10...10^2$	$0...10^{-1}$	
В зонах геологических нарушений							
	Хаотические	Беспорядочно		100...1000	$10^{-2}..10^{-4}$	$0...10^{-2}$	$10^{-2}..10^{-4}$

Известно, что основную массу дефектов массива следует рассматривать как разрывы сплошности первого рода, т.е. практически без относительного смещения берегов трещин. Исключение составляют места обрушения непосредственной и осадок основной кровли, где смещение блоков сопоставимо с мощностью разрабатываемого пласта. Ширина раскрытия этих трещин может достигать нескольких дециметров. В этих полостях следует ожидать не только фильтрации, но и напорного движения в турбулентном режиме метановоздушной смеси под действием вентиляционной или тепловой депрессии.

Следует обратить внимание на очень большой диапазон изменения ширины раскрытия трещин, от практически нулевого значения до нескольких сантиметров и более. Этот параметр определяет разнообразие физических процессов, которые могут происходить в трещинах.

Так при малой ширине раскрытия длина свободного пробега молекулы газа  $\lambda = 10^{-6} \dots 10^{-8}$  м соизмерима с расстоянием между стенками трещины  $\delta$ , что может способствовать эффузивным процессам. Такие полости принято считать микротрещинами. При большем раскрытии трещины  $\delta > 10^{-6}$  м (макротрещина) – преобладает фильтрация газов. Особый интерес представляют случаи сочетания больших и малых трещин, то есть система макротрещин, окруженных сетью микротрещин.

На основе составленных представлений о параметрах трещиноватости были рассчитаны показатели, характеризующие проницаемость углепородного массива вблизи очистной выработки.

Проницаемость трещин определяли, используя уравнение Буссинеска

$$K_{TP} = \frac{\delta^2}{12} 10^6, \text{ Д}$$

где  $\delta$  – раскрытие (зияние) трещины, см.

Проницаемость  $K_T$  среды принято определять из выражения

$$K_T = \frac{\alpha \Gamma \delta^3}{12}, \text{ м}^2$$

где  $\alpha \approx 1$  – коэффициент, зависящий от геометрии (извилистости) трещины;  $\Gamma$  – густота (частота) трещин,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\delta$  – ширина раскрытия трещин, м.

Термически тонкое тело ( $Bi \rightarrow 0$ ), или диффузионно активное (внутри которого  $\text{grad } P \neq 0$ ) характеризуют коэффициентом массовой нагрузки или формы блока, отражающим отношение отдающей газ поверхности к объему блока

$$K_1 = \frac{S}{V}, \text{ м}^{-1},$$

где  $S$  – площадь поверхности тела,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – его объем,  $\text{м}^3$ .

Для наиболее простых форм тел значение  $K_1$  представлено в табл. 2.

Таблица 2 – Коэффициент массовой нагрузки  $K_l$  геометрических тел правильной формы

Форма тела	пластина	цилиндр	сфера	балка	куб
Значение $K_l, м^{-1}$	1	2	3	4	6

Этот коэффициент линейно связан со скоростью диффузии газа из блока, чем больше значение  $K_l$  тем быстрее выделяется из блока газ. При этом, чем меньше геометрические размеры тела, тем выше вероятность выполнения условия  $\text{grad } P \neq 0$ .

Результаты обобщения данных об изменениях параметров трещиноватости горного массива под влиянием очистных работ приведены в табл. 3.

Как следует из представленных в табл. 1 и табл. 3 данных под влиянием очистных работ происходит уменьшение в 3...10 раз размеров породных блоков и увеличение в 1,5...6 раз коэффициента их массовой нагрузки. Увеличение частоты трещин в близи очистной горной выработки и связанное с этим уменьшение размеров породных или угольных блоков способствует интенсификации процесса диффузии газов.

Качественной особенностью породной толщи является сочетание в ней макротрещин, окруженных сетью микротрещин, ширина раскрытия которых меньше чем длина свободного пробега молекул газов. При этом протяженность макро- и микротрещин намного больше, чем ширина их раскрытия.

Известно, что в каналах такого вида и размеров движение газов не подчиняется законам классической теории движения жидкости, в частности, уравнению Бернулли. Состояние газа, при котором длина свободного пробега его молекул  $\lambda$  соизмерима или более характерного размера сосуда  $\delta$ , в котором находится газ, называется вакуумом.

Важнейшей характеристикой системы в динамике разреженного газа является число Кнудсена ( $Kn$ ), которое определяется как отношение средней длины свободного пробега молекул газа  $\lambda$  к характерному геометрическому параметру задачи  $\delta$ . Практически все виды трещин могут иметь ширину раскрытия меньшую, чем  $\lambda$  и, следовательно, заключенный в них свободный газ находится в условиях вакуума.

Газ при одной и той же плотности в сосудах разного размера может находиться в обычном состоянии при  $\lambda \ll \delta$  и описываться классическими уравнениями переноса, а может представлять собой вакуум при  $\lambda > \delta$ , для описания которого эти уравнения не применимы.

В первом приближении, с учетом известных исследований [12], отнесем к «длинным» микротрещины имеющие показатель  $(l/\delta) > 3 \cdot 10^{-2}$ , а к «коротким»-  $(l/\delta) < 3 \cdot 10^{-2}$ . Под влиянием горных работ этот показатель может уменьшаться теоретически до 0, однако и «длинные» каналы продолжают существовать, имея при этом аэродинамическую связь с «короткими» и меж-

ду собой. А в этом случае необходимо учитывать влияние взаимодействия молекул с поверхностью.

В условиях постоянства температуры массива, при изотермической диффузии, происходит разделение газовых смесей [13]. Суть явления заключается в том, что через поры проходит в первую очередь газ, молекулы которого имеют меньшую молекулярную массу, а затем газ, имеющий более тяжелые молекулы. При этом коэффициент разделения  $\alpha_1$ , определяемый как отношение потоков двух компонентов  $J_1$  и  $J_2$ , является степенной функцией отношения их молекулярных масс  $M_1$  и  $M_2$  [14]

$$\alpha_1 = \frac{J_1}{J_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Таблица 3 – Изменение характеристик породного массива под влиянием очистных работ

Тип и параметры трещин: ( $\Gamma$ - частота, $m^{-1}$ ; $L$ и $\delta$ – протяженность и ширина раскрытия, м)	Число Кнудсена $K_n = \lambda/\delta$ (наличие вакуума)	Отношение протяженности трещины к ширине ее раскрытия $l/\delta$	Коэффициенты		
			Проницаемости трещины, $K_{тр},$ Д	Проницаемости среды, $K_T,$ $m^2$	Массовой нагрузки, $K_{1\backslash}$ (форма блока)
В нетронутом массиве					
Слоевые, $\Gamma=0,3...30,$ $l=1...10$ $\delta=10^{-8}...10^{-10}$	$10^2$ (да) ... $10^4$ (да)	$10^8...10^{10}$	$8 \cdot 10^{-12}...8 \cdot 10^{-16}$	$2.5 \cdot 10^{-24}...2.5 \cdot 10^{-33}$	1...4 (пластина...балка)
Кливажные и торцовые, $\Gamma=0,3...50,$ $l=0,05...10$ $\delta=10^{-3}...10^{-9}$	$10^3$ (да)... $10^{-3}$ (нет)	$10^4...5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^{-2}...8 \cdot 10^{-14}$	$2.5 \cdot 10^{-9}...4 \cdot 10^{-27}$	
В зоне геологического нарушения					
Хаотические, $\Gamma=100...1000,$ $l=10^{-2}...10^{-4},$ $\delta=0...10^{-2}$	- (да) ... $10^{-4}$ (нет)	$10^8...10^{10}$	0...80	$0...8 \cdot 10^{-2}$	6 и более (куб, неправильная форма)
В зоне влияния горных работ					
Дополнительное расслоение, $\Gamma=0,3...100,$ $l=10...10^2,$ $\delta=0...10^{-1}$	- (да)... $10^{-5}$ (нет)	$1...10^3$	$0...8 \cdot 10^2$	$0...8 \cdot 10^{-1}$	3...6 (призма...куб)
Трещины давления, $\Gamma=2...200,$ $l=5 \cdot 10^{-3}...5 \cdot 10^{-2}$ $\delta=0...10^{-1}$	- (да)... $10^{-5}$ (нет)	$1...10^3$	$0...8 \cdot 10^2$	$0...17 \cdot 10^{-2}$	

Косвенным подтверждением этому может служить установленное экспериментально неравномерное распределение в плоскости напластования непредельных углеводородов (этилен, ацетилен) в условиях месторождения шахты им. А.Ф. Засядько. Они, как наиболее тяжелые составляющие газовой смеси сосредоточены в местах с наибольшей шириной раскрытия трещин, а более легкие газы, такие как гелий, метан, водяные пары – в узких.

Представленные в работе данные позволяют сделать предположение, что при разработке математических моделей, описывающих процессы дегазации углегазового массива вблизи очистных горных выработок, следует учитывать особенности изменения блочности и параметров трещиноватости газоносной среды. Предварительные оценки показывают, что возможно практическое использование установленного явления эффузивного массопереноса для интенсификации дегазации осадочной породной толщи и повышения безопасности и эффективности горных работ. Для этого необходимо обеспечить получение более достоверной информации о трещиноватости углегазовых месторождений и даже отдельных их участков.

### **Выводы**

1. На основании анализа экспериментальных данных уточнены закономерности трещиноватости нетронутого горного массива и ее изменений под влиянием очистных работ.

2. Анализ результатов исследования блочности осадочной породной толщи позволяет утверждать, что не только в зонах геологических нарушений, но и на участках тектонической нарушенности нетронутого очистными работами углегазового массива миграция флюидов возможна в нормальном напластованию направлении.

3. Под влиянием очистных работ происходит уменьшение в 3...10 раз размеров породных блоков и увеличение в 1,5...6 раз коэффициента их массовой нагрузки, что способствует интенсификации диффузии газов из углей и пород в трещины.

4. Исходя из параметров трещин установлено, что в нетронутом горными работами массиве преобладают условия не фильтрационного, а эффузивного массопереноса газов в межблоковом пространстве. Подтверждением этому могут служить экспериментальные сведения о неравномерном распределении тяжелых углеводородов в плоскости напластования угольных пластов.

5. При разработке математических моделей, описывающих процессы дегазации углегазового массива вблизи очистных горных выработок, следует учитывать особенности изменения блочности и параметров трещиноватости газоносной среды, и связанные с ними физические процессы.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов Г.А. Кливаж (отдельности) в углях, вмещающих породах и пути его практического использования. – М.Л.: ГОНТИ, 1939, часть 1. – 108 с.
2. Костенко В.К. Геомеханические и технологические способы предупреждения и ликвидации возгораний угля// Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. // НИИГД. – Донецк, 1998.– С. 69 – 75.
3. Свержевский В.Л. Инженерно- геологическая характеристика пород среднего карбона юго- западной части Донбасса в связи с прогнозом устойчивости горных выработок. Автореф. Дисс. ...канд. техн. наук. – М., 1970. – 24 с.

4. Васильев В.П., Малинин С.И. Влияние основных геологических факторов на поведение пород в горных выработках.- М.: Госгортехиздат, 1960. – 96 с.
5. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
- Свержевский В.Л. О результатах изучения устойчивости пород кровли и почвы горных выработок шахт Донецкой области // Материалы по геологии и разведке углей Донбасса.– М.: Недра, 1969. – С. 132 – 145.
6. Свержевский В.Л., Субботин В.П. Зоны искусственной трещиноватости в кровле и почве очистных выработок // Уголь Украины. – 1976. – № 10. – С. 44 – 45.
7. Костенко В.К. Геомеханические и аэрологические основы предотвращения пожаров от самонагревания угля в шахтах: Автореф. ...д-ра техн. наук: 21.06.02 / МакНИИ. – Макеевка, 2004. –36 с.
8. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин и др.- М.: Недра, 1969. – 392 с.
9. Рупнейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород.- М.: Недра, 1975. – 222 с.
10. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна.- М.: Недра, 1966. – 180 с.
11. Борисов С.Ф. Межфазная граница газ- твердое тело: структура, модели, методы исследования: Учебное пособие. – Екатеринбург: Из-во УГУ, 2001. – 268 с.
12. Коган М.Н. Динамика разряженного газа.- М.: Наука, 1967.
13. Шапошник В.А. Мембранные методы разделения смесей веществ / Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 9. – С. 26 – 32.

**УДК 550. 83**

Канд. геол. наук М.М.Довбнич,  
канд. геол. - минерал. наук В.П. Солдатенко  
(Национальный горный университет),  
канд. физ.-мат. наук А.А. Бобылев  
(ДГУ)

### **ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ СРЕДЫ**

В роботі розглянуто основні методичні положення, результати розрахунків та аналізу літостатичних і тектонічних напружень, що діють в осадовій товщі, на основі геомеханічних моделей, які отримано за даними сейсморозвідки. Обговорюється можливість використання полів механічних напружень при вирішенні широкого кола задач вугільної геології.

### **ESTIMATION OF THE STRESS- DEFORMED STATE OF THE COAL-SEDIMENTARY COVER ON THE BASIS OF STRUCTURAL-VELOCITY MODELS**

The calculation and the analysis of the tectonic and lithostatic stresses in the sedimentary cover on the basis of structural-velocity models using the seismic date were considered. The opportunities of mechanical stress fields usage as an additional criterion at geological constructions is discussed.

Одним из направлений исследовательской работы кафедры геофизических методов разведки Национального горного университета является оценка и анализ напряженно-деформированного состояния геологической среды геофизическими методами [1-3]. Геофизические данные косвенно позволяют выполнять оценку напряженно-деформированного состояния на значительных по площади территориях. Напряженно-деформированное состояние является одной из важнейших ха-