

В.Н. Ревва, д-р техн. наук,
В.А. Васильковский, канд. ф-м. наук,
А.В. Молодецкий, м.н.с.
(ИФГП НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ШАРОВОГО ТЕНЗОРА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕЙ ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ В ОБЪЕМНОМ ПОЛЕ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Експериментально оцінений вплив рівня кульового тензора напружень на фізико-механічні властивості вугілля при його руйнуванні в умовах тривісного нерівнокомпонентного стиснення.

SPHERICAL TENSOR LEVEL EFFECT ON THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF COALS AT FRACTURE IN THE VOLUMETRIC COMPRESSION STRESS FIELD

It has been experimentally appraised how a spherical stress tensor level effect on physical-mechanical properties of coal at fracture in the triaxial inequicomponent compression conditions.

Физическое моделирование поведения горных пород и углей в условиях объемного напряженного состояния остается важной научно-прикладной проблемой. Ранее с помощью физического моделирования на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) осуществлена оценка влияния глубины залегания углей на их механические свойства, где установлено появление экстремумов в изменении указанных свойств в районе глубины 2000м. Поэтому возникла необходимость в объяснении это явления. Было высказано одно из предположений, что при шаровом тензоре, соответствующем глубине 2000м, могут происходить некие физико-химические процессы в угле.

В настоящей работе предпринята попытка оценить влияние уровня шарового тензора на физико-механические свойства углей при их разрушении в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия.

Поскольку горные породы и угли в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия разрушаются за счет прорастания критически ориентированных сдвиговых трещин, а наиболее энергетически выгодным для разрушения является вид напряженного состояния μ_σ , соответствующий обобщенному сдвигу, в дальнейшем моделировался $\mu_\sigma = 0$.

Учитывая также то, что при моделировании глубины залегания угольных пластов в экстремальной точке изменения механических свойств около 2000м для данного угля уровень шарового тензора $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \approx 27 \text{ МПа}$, в дальнейших испытаниях создавались такие уровни напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, чтобы уровень шарового тензора был больше 27 МПа.

Нагружение образцов осуществлялось в квазистатическом режиме по следующей схеме. На первом этапе создавалось гидростатическое давление $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, при этом σ_3 принимало значение 4, 9, 14 МПа для каждого из экспериментов. Затем, исходя из того, что должен реализовываться вид напряжен-

ного состояния, соответствующих обобщенному сдвигу, т.е.

$\mu_{\sigma} = 2 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) - 1 = 0$, программа нагружения осуществлялась по схеме

$\sigma_1 = 2\sigma_2 - \sigma_3$. Нагружение образцов производилось до момента разрушения, при этом в процессе деформирования непрерывно фиксировались уровни напряжений и деформаций. После завершения каждого из испытаний рассчитывались максимальный уровень шарового тензора и механические свойства угольных образцов. В результате получены зависимости от уровня шарового тензора модуля деформации, объемной прочности и коэффициента поперечной деформации, которые подтверждают выводы, что при повышении уровня шарового тензора возрастают объемная прочность, пластичность и коэффициент поперечной деформации.

Для понимания физики явления существования экстремума в зависимости механических свойств углей от глубины залегания пластов были проведены исследования выхода метана из исходного и подверженного разрушению при высоком уровне сжимающих напряжений углей.

В работе [1] на уровне качественных оценок было показано, что приложение к образцу угля некоторых видов напряжений может приводить к изменению фильтрационных и диффузионных характеристик движения метана в угле. В дальнейшем была разработана детальная физически обоснованная методика количественной оценки этих характеристик. В основе методики лежит блоковая модель угля, согласно которой каменный уголь представляет собой совокупность мельчайших образований – микроблоков, свободный объем между которыми составляет объем открытых пор и трещин. Указанные поры – фильтрационные каналы - сообщаются с внешней поверхностью угля и служат путями эвакуации газа после его диффузии из микроблоков. Микроблоки представляют собой области угольного вещества не имеющие открытых пор и трещин. Эти образования очень малы ($r_{мб} \ll R_{сп}$), распределены по всему объему гранул и через систему трещин и открытых пор сообщаются с поверхностью угля. Для наглядности на рис. 1 схематично показан вариант блочного строения угля.

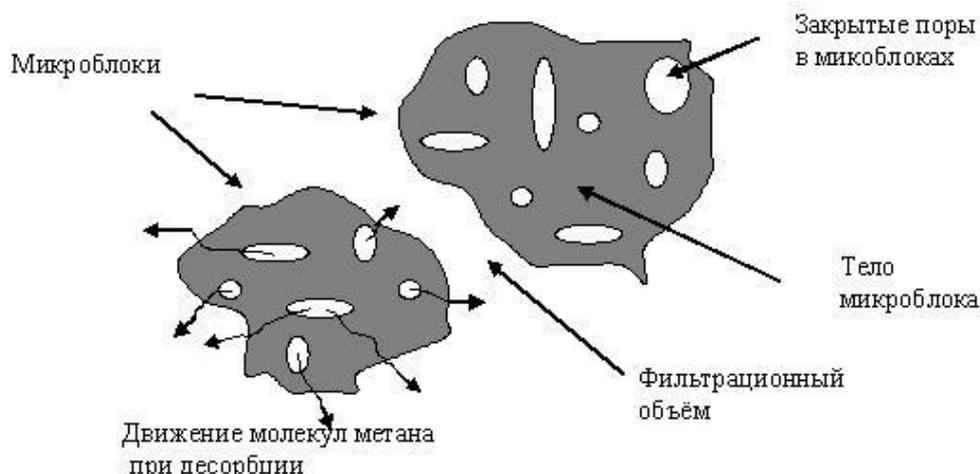


Рис. 1 – Схематическое представление структуры угля в блоковой модели

В такой модели диффузия метана происходит из закрытых пор малых частиц - микроблоков, средний размер $\overline{r_{.мб}}$ которых не зависит от размера гранулы угля. Так как микроблоки и закрытые поры очень малы, их большая суммарная поверхность может обеспечить диффузионный газовый поток достаточной интенсивности. Основным резервуаром метана в блоковой модели являются закрытые поры в микроблоках. Кроме этого метан содержится также в открытых порах угля и растворён в теле микроблоков.

При десорбции наряду с диффузией из микроблоков происходит фильтрация газа открытыми порами, которая «регулирует» скорость выхода поступающего из микроблоков газа. Согласно публикации [2], на определенной стадии десорбции устанавливается баланс потоков газа, выделяемого путем диффузии – $I_o(t) = \partial N_o(t) / \partial t$ и фильтруемого порами Пуазейля – $I_\phi = \partial N_\phi(t) / \partial t$. В этом случае можно говорить о равенстве всех потоков: десорбции, фильтрации и диффузии: $I_{dec}(t) = I_\phi(t) = I_o(t)$. Характерное время десорбции $\tau^{dec}(t)$ газа в условиях баланса потоков представляет собой линейную комбинацию характерных времён процессов фильтрации $\tau^\phi(t)$ и диффузии $\tau^d(t)$:

$$\tau^{dec}(t) = [\tau^\phi(t)(1 + U(t))] + \tau^d(t) \quad (1)$$

Здесь $\tau^\phi(t) = N_\phi(t) / [\partial N_\phi(t) / \partial t]$, $\tau^d(t) = N_o(t) / [\partial N_o(t) / \partial t]$. Параметры $N_\phi(t)$ и $N_o(t)$ отражают количество газа в открытых порах и теле микроблока, соответственно. Коэффициент $U(t) = N_{zn}(t) / N_\phi(t)$ характеризует изменяющееся в ходе десорбции соотношение количества газа в закрытых $N_{zn}(t)$ и открытых $N_\phi(t)$ порах угля (фильтрационных каналах).

Физический смысл термина «характерное время» следует из вида его аналитического представления. Так, например, $\tau^\phi(t)$ - это условное время необходимое для полной дегазации открытых пор и трещин при условии, что их подпитка источниками газа отсутствует, а скорость дегазации (поток I_ϕ) будет оставаться постоянной. В соответствии с этим член в квадратных скобках выражения (1) представляет собой фильтрационную составляющую характерного времени десорбции $\tau^{dec}(t)$ и он отражает гипотетическое время, которое необходимо для истечения газа, содержащегося в данный момент в закрытых и открытых порах угля, при условии, что поток газа будет оставаться неизменным.

Мы предполагаем, что при воздействии на угольный пласт механических напряжений возможны необратимые изменения в структуре угля и, как следствие, изменения его сорбционных и десорбционных характеристик. В терминах диффузионно-фильтрационной модели мы вправе ожидать соответствующих изменений составляющих выражения (1).

Исследования кинетики выхода метана из каменных углей проводились методом десорбции в вакуумированный сосуд известного объема. Точность метода определяется точностью измерения объема сосуда, его термостатирования и измерения давления газа, собранного в сосуде. Этот метод свободен от влияния

влажности воздуха и позволяет проводить измерения процесса десорбции длительное время. Чтобы исключить дополнительный варьируемый параметр – влажность угля, для опытов использовались предварительно высушенные образцы. На рис. 2 представлена схема установки, которая использовалась для изучения кинетики десорбции метана из угля. Установка состоит из металлического контейнера 1 с образцом угля. Посредством вентиля 2 контейнер сообщается с накопительным сосудом 3. Контейнер и накопительный сосуд сообщаются через вентиль 4 с вакуумным насосом 5. Контейнер с углём и накопительный сосуд находятся в термостате 6, изготовленном из пенопласта. Изменение давления газа в сосуде 3 регистрируется датчиком давления 7 и соответствующий сигнал поступает в блок памяти компьютера 8.

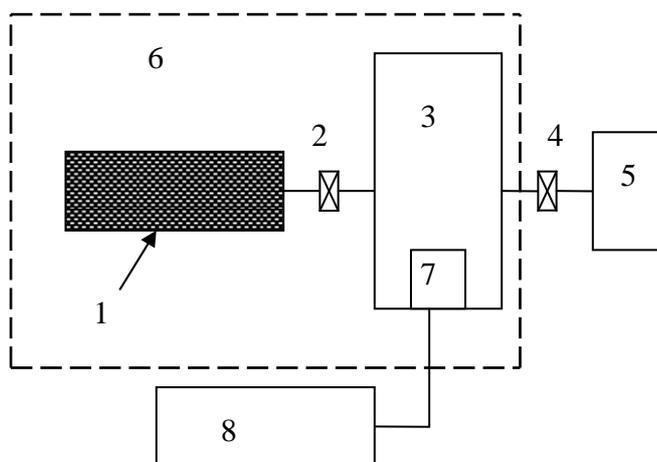


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки для регистрации хода десорбции метана из угля.

В качестве образцов использовался уголь шахты «Красноармейская-Западная №1». После дробления и отсева на ситах уголь сушился при температуре не выше 370°K в течении нескольких часов. Качество высушивания контролировалось анализом формы линии спектра ЯМР H^1 по известной методике.

Предварительно вакуумированные контейнеры с образцами подключали к баллону со сжатым метаном и выдерживали образцы в метановой атмосфере от 8 до 20 суток (в зависимости от размера гранул угля). После насыщения угля метаном контейнер отсоединялся от баллона и сжатый газ из свободного объема контейнера сбрасывался в атмосферу. Через 10-15 секунд контейнер с насыщенным метаном образцом угля через вентиль 2 подсоединялся к накопительному сосуду 3, который был предварительно вакуумирован насосом 5.

В дальнейшем, при закрытом вентиле 4 и открытом вентиле 2 производилась десорбция метана из угля в накопительный сосуд 3. Объем контейнера, масса угля, а также объем накопительного сосуда подбирались так, чтобы давление P_{nc} метана, десорбированного из угля в сосуд 3, не превышало ≈ 25 кПа. Таким способом мы сводим к минимуму влияние давления газа в накопительном сосуде на ход десорбции. Система накопительный сосуд – вакуумметр выполняет здесь функцию измерительного зонда. И чем больше его объем, тем

меньше его влияние на ход десорбции. Контрольные измерения показали, что дополнительное вакуумирование сосуда 3 приводит к росту выделения метана из угля не более чем на 1%. В ходе десорбции изменение давления газа P_{nc} в сосуде 3 ежесекундно регистрировалось датчиком давления 7 и соответствующий сигнал поступает в блок памяти компьютера 8. Диапазон измерений избыточного давления датчиком 7 ограничен 40 кПа. Чувствительность датчика с аналогово-цифровым преобразователем – менее 1 Па. Информация о ходе изменения давления $P_{nc}(t)$ газа в сосуде 3 в последующем используется для компьютерной оптимизации параметров интерполяционной функции имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Для интерполяции использовалась функция вида $P_{nc}(t) = a(1 - (1 + bt)^{-0.5}) + c(1 - \exp(-t/d))$, которая, как показывают исследования [10], обеспечивает наилучшее приближение при описании хода десорбции газов.

В процессе подготовки и проведения экспериментов выполнялись условия: а) насыщение всех образцов метаном производилось при одинаковом давлении газа – 2,1 МПа; б) регистрация десорбции прекращалась после того, как изменение давления газа в накопительном сосуде было меньше 200 Па за сутки.

При анализе каждой кривой хода десорбции мы оценивали характерное время τ^{dec} заполнения накопительного сосуда газом:

$$\tau^{dec} = \frac{N_{nc}^{max} - N_{nc}(t)}{\partial N_{nc}(t) / \partial t} = \frac{N_{yz}(t)}{\partial N_{nc}(t) / \partial t}, \quad (2)$$

где $N_{nc}(t)$ - количество газа, $\partial N_{nc}(t) / \partial t$ – скорость изменения количества молекул газа в накопительном сосуде (поток газа из угля), а N_{nc}^{max} - максимальное количество молекул газа в сосуде после завершения десорбции метана из образца угля.

Последнее равенство в (2) записано в предположении, что в указанных опытах по десорбции количество метана в угле $N_{yz}(t)$ определяется выражением $N_{yz}(t) = N_{nc}^{max} - N_{nc}(t)$. В этом случае, для характерного времени десорбции метана из угля будем иметь:

$$\tau_{yz}^{dec} = \frac{N_{yz}(t)}{\partial N_{yz}(t) / \partial t} = -\tau^{dec}. \quad (3)$$

Нас, далее, будут интересовать только абсолютные значения величин τ^{dec} и τ_{nc}^{dec} , поэтому при обсуждении опытных данных мы будем использовать одно обозначение - τ^{dec} . Параметры N_{nc}^{max} , $N_{nc}(t)$ и $N(t)$ могут быть определены в результате графического или компьютерного анализа кривой хода десорбции метана из образца угля.

Выбор характерного времени τ^{dec} в качестве базового параметра в сравнительном анализе кинетики десорбции обусловлен двумя причинами. Одна – это

высокая чувствительность характерного времени к размеру гранул угля. Вторая, не менее важная, обусловлена тем, что величина τ^{dec} не зависит от количества гранул угля в образцах.

Число N_{nc} молекул газа, выделившееся в накопительном сосуде объёмом V_{nc} к моменту регистрации, может быть определено по известной формуле уравнения состояния газа

$$N_{nc}(t) = \frac{P_{nc}(t) \cdot V_{nc}}{k_B T},$$

где $P_{nc}(t)$ – давление газа в накопительном сосуде, образовавшееся к моменту его регистрации, k_B – постоянная Больцмана, T – температура по шкале Кельвина. Относительная погрешность определения P_{nc} или численного значения N_{nc} составляла не более 3%. Поскольку $P_{nc}(t)/N_{nc}(t) = const$, то при расчётах величины τ^{dec} мы пользовались числовыми значениями давления в накопительном сосуде. Так, например, характерное время десорбции определялось, по аналогии с (2), как

$$\tau^{dec} = \frac{P_{nc}^{max} - P_{nc}(t)}{\partial P_{nc}(t)/\partial t}. \quad (4)$$

При десорбции метана из угля величина газового потока $I = \partial N_{nc}(t)/\partial t$ связана со скоростью изменения давления P_{nc} в сосуде V_{nc} :

$$\partial P_{nc}/\partial t = (\kappa_B T/V_{nc}) \cdot I.$$

Поскольку в ходе эксперимента температура газа в сосуде V_{nc} остаётся постоянной, можно считать, что изменение величины $\partial P_{nc}/\partial t$ полностью соответствует характеру и величине изменения потока I . Поэтому при обсуждении получаемой из эксперимента величины $\partial P_{nc}/\partial t$ или её изменения со временем, далее, для удобства изложения мы будем пользоваться терминами «поток» или «изменение потока», не забывая, при этом, о существовании между этими величинами коэффициента пропорциональности – $\kappa_B T/V_{nc}$.

Мы изучали ход десорбции метана из четырёх образцов угля, три из которых перед сорбцией предварительно подвергались воздействию напряжений различной величины – уровень шарового тензора в момент разрушения составлял 36МПа, 50МПа и 58МПа. Все образцы массой 19г представляли собой мелкодисперсный порошок угля в гранулах 0.2÷0.25мм. Использовался накопительный сосуд объёмом $V_{nc} = 1755 \text{ см}^3$. В ходе эксперимента температура контейнера с углём и накопительного сосуда поддерживалась равной $T=294\pm 1\text{К}$.

На рис. 3 показано изменение давления P_{nc} в накопительном сосуде в ходе десорбции метана из указанных угольных образцов. Рисунок 4 иллюстрирует

зависимость скорости изменения давления $P_{нс}$ от величины механических напряжений, которым подвергались образцы угля перед насыщением метаном.

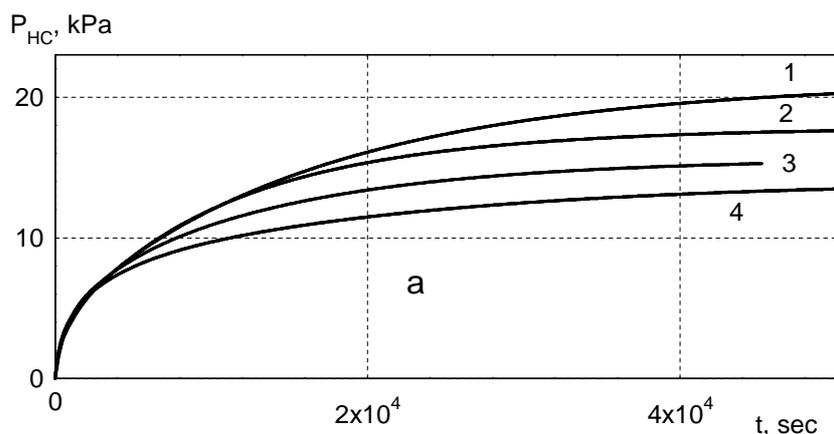


Рис. 3 – Изменение давления в накопительном сосуде при десорбции метана из угля в гранулах $0.2 \div 0.25$ мм: 1- исходный образец угля; 2-, 3-, и 4- образцы угля, которые подвергались разрушению при уровне шарового тензора 36МПа, 50МПа и 58МПа, соответственно.

Обращает на себя внимание, что с ростом уровня шарового тензора давление $P_{нс}^{max}$, которое образуется в накопительном сосуде после завершения десорбции метана, то есть газоносность угля, уменьшается, а начальная скорость выделения метана возрастает.

Для того чтобы разобраться в причинах наблюдаемых изменений, следует учесть, что в ходе десорбции происходит трансформация механизма выделения газа. Согласно работе [4], ещё во время подготовки к измерениям, когда мы производим сброс избыточного давления в камере насыщения, имеет место начальная фаза десорбции: происходит эвакуация метана из открытых пор и трещин угля. Отличительной особенностью начальной фазы является фильтрация газа в открытых порах угля. В этой фазе за несколько десятков секунд давление метана в открытых порах угля уменьшается от исходного (равновесного) значения в несколько МПа до единиц кПа.

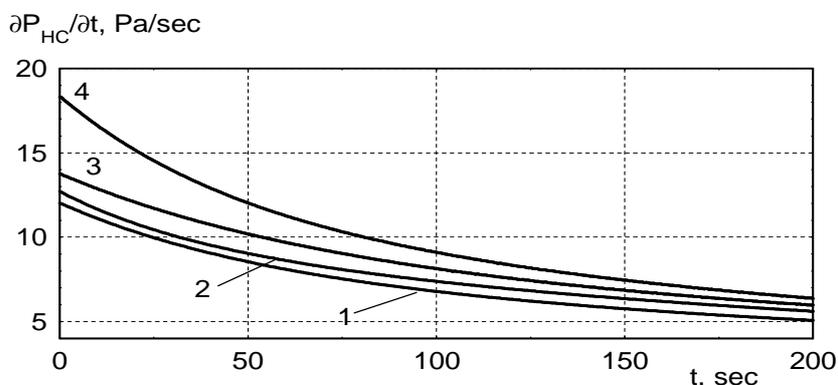


Рис. 4 – Зависимость скорости изменения давления в накопительном сосуде объёмом 1755 см^3 при десорбции метана из угля от величины механических напряжений. Обозначения такие же, как и на рисунке 3.

Заключительная фаза, наоборот, отличается большой продолжительностью и слабой интенсивностью выделения газа. В этой фазе переходные процессы завершены, и кинетика десорбции полностью определяется текущим содержанием газа в угле, размером куска угля и его структурой. Диффузионный процесс становится ведущим, а источником выделяемого газа служат закрытые поры микроблоков угля. Как мы уже отмечали, в определённый момент времени возникают условия для установления баланса диффузионного и фильтрационного потоков и этот баланс далее выдерживается до полного выделения газа.

Между начальной и заключительной фазами десорбции метана из угля имеет место продолжительная переходная фаза, в которой происходит смена ведущей роли механизмов выхода метана – от фильтрации к диффузии.

Учитывая реализуемые в данных опытах условия подготовки к измерениям, следует заключить, что регистрация десорбции в нашем случае начинается только с переходной фазы. В первые минуты этой фазы влияние фильтрационных процессов на кинетику десорбции может быть ещё достаточно сильным. Иными словами, значительный вклад в поток газа в самом начале регистрируемой десорбции обусловлен не завершённым ещё процессом фильтрации газа транспортными каналами (открытыми порами и трещинами).

Согласно теории вязкого ламинарного фильтрационного течения газа, его поток I пропорционален перепаду квадрата давления газа в открытых порах и проницаемости k угля – $I \sim k \cdot \Delta(P_{on}^2)$. Как видно из рис. 4, при переходе от образца 1 угля к образцу 4 поток газа возрастает почти в 1.5 раза. Это однозначно указывает на то, что под воздействием напряжений произошли необратимые изменения структуры угля. Если предположить, что в момент начала регистрации десорбции перепад давления метана в открытых порах во всех образцах угля был одинаков, то обнаруженный рост газового потока следует связывать с таким же ростом проницаемости угля.

Уменьшение газоносности угля в результате действия механических напряжений логично связать с разрушением наиболее крупных закрытых пор в таких же крупных микроблоках угля.

Таким образом, предварительный анализ кинетики десорбции метана указывает на то, что действие высоких уровней напряжений вызывает необратимые изменения в пористой структуре угля. Для более детального анализа, включающего количественные оценки изменений фильтрационных и диффузионных характеристик угля, нам потребуются аналогичные сведения о кинетике десорбции из образцов угля в более крупных гранулах.

В работе [13] показан способ, с помощью которого, имея экспериментальные данные о характерном времени десорбции τ^{dec} для гранул угля большого R и малого r размера, можно найти величины составляющих выражения (1). При условии одинакового содержания метана в равных по массе двух образцах угля (в гранулах r и R) для составляющих формулы (1) получены следующие выражения:

$$\tau_r^\phi(t) \cdot [1+U] = \frac{\tau_R^{\text{dec}}(t) - \tau_r^{\text{dec}}(t)}{W-1}; \quad (5)$$

$$\tau_R^\phi(t) \cdot [1+U] = \frac{W(\tau_R^{\text{dec}}(t) - \tau_r^{\text{dec}}(t))}{W-1}, \quad (6)$$

$$\tau^d(t) = \frac{W\tau_r^{\text{dec}}(t) - \tau_R^{\text{dec}}(t)}{W-1}, \quad (7)$$

В этих выражениях $W = \frac{R}{r} \cdot \sqrt{\frac{I_r}{I_R}}$, а I_r и I_R - потоки газа из образцов угля в малых r и больших R гранулах.

Таким образом, проводя опыты по десорбции метана из двух фракций угля, которые испытали воздействие одинаковых напряжений, можно получать информацию о влиянии этих напряжений не только на фильтрационные, но и диффузионные параметры системы уголь-метан.

Мы провели подобные измерения десорбции метана на двух образцах угля в гранулах размером $2,0 \div 2,5$ мм. Навески угля отсеивались после измельчения брикетов, из которых были получены изученные ранее образцы 1 и 4 в гранулах $0,2 \div 0,25$ мм. Масса каждого образца и объём накопительного сосуда были такими же, как и в предыдущих исследованиях. Насыщение метаном производилось при давлении газа – 2,1 МПа в течение 20 дней.

На рис. 5 показан ход десорбции метана из образцов 1 и 4 в гранулах $2,0 \div 2,5$ мм. В кинетике десорбции заметны те же особенности, какие получены на образцах в мелких гранулах – газоносность угля, подвергавшегося ранее действию внешних напряжений, уменьшается, а начальная скорость выделения газа при десорбции растёт. Если сравнивать время выхода метана из угля в мелких и крупных гранулах, то можно заметить, что оно отличается почти в 50 раз. Столь большое различие замечено нами впервые.

Согласно нашим исследованиям десорбции метана из углей шахт им. А.Ф. Засядько, им. А.А. Скочинского, им. Е.Т. Абакумова величина отношения $\tau_R^{\text{dec}}(t) / \tau_r^{\text{dec}}(t)$ находится в пределах от 2 до 4, из угля шахты им. С.М. Кирова ~ 12 , а наибольшее значение (~ 35) обнаружено для антрацита шахты «Коммунист». Показано, что высокие значения отношения $\tau_R^{\text{dec}} / \tau_r^{\text{dec}}$ характеризуют угли, фильтрационная составляющая десорбции которых значительно превышает составляющую диффузионную: $\tau^\phi(1+U) \gg \tau^d$. Учитывая изложенное выше, можно ожидать, что в случае углей шахты «Красноармейская-Западная №1» имеет место существенное неравенство фильтрационного и диффузионного вкладов.

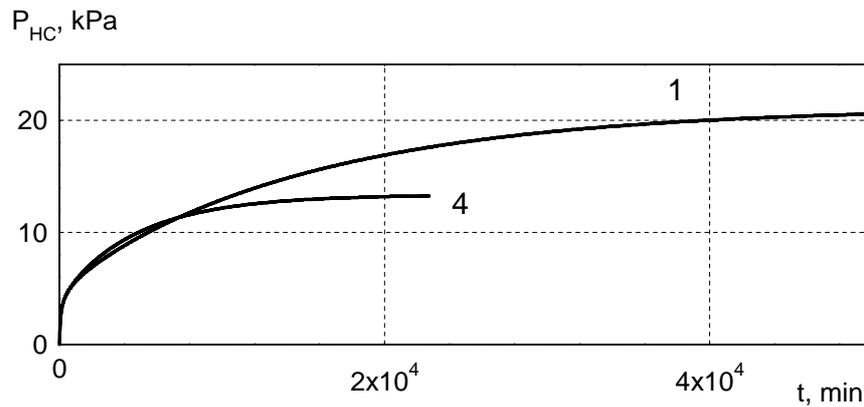


Рис. 5 – Изменение давления в накопительном сосуде при десорбции метана из образцов угля в гранулах 2,0÷2,5 мм. Обозначения такие же, как на рис. 3.

На основе данных, представленных на рис. 3 и 5, с помощью выражений (4-7) мы получили численные значения вкладов $\tau^\phi(t) \cdot (1+U)$ и $\tau^d(t)$. При расчётах мы использовали данные, отражающие кинетику заключительной фазы десорбции, когда установился баланс потоков фильтрации и диффузии. На рис. 6, 7 и 8 в графическом виде показаны результаты расчётов. Видно, что фильтрационная составляющая десорбции $\tau^\phi(t) \cdot (1+U)$ в образце, разрушенном при шаровом тензоре 58 МПа, примерно, в три раза меньше, чем в исходном образце.

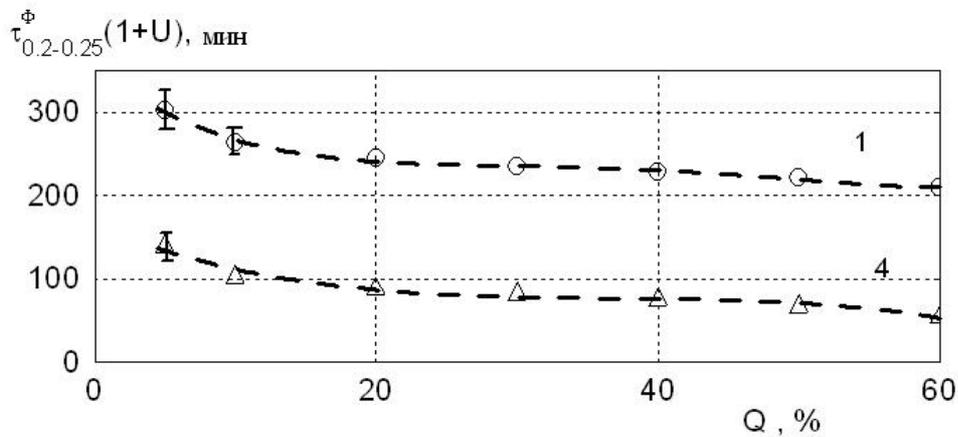


Рис. 6 – Изменение величины $\tau^\phi(t) \cdot (1+U)$ для образцов 1 и 4 в гранулах 0,2÷0,25 мм в зависимости от процентного содержания метана в угле при десорбции.

Проведём краткий анализ причин такого изменения. Известно, что, характерное время фильтрации определяется вязкостью η газа, открытой пористостью γ и проницаемостью κ угля, а также зависит от длины R канала фильтрации и перепада давления газа $P_\phi(t)$ в этом канале:

$$\tau^\phi(t) = R^2 \eta \gamma / \pi^2 \kappa \cdot P_\phi(t) \sim 1/S_{on} \cdot P_\phi(t). \quad (8)$$

Выражение для τ^ϕ записано здесь в приближении, что давлением метана на выходе фильтрационного канала можно пренебречь, а параметр $S_{on} \sim \kappa/\gamma$ отражает площадь сечения канала фильтрации.

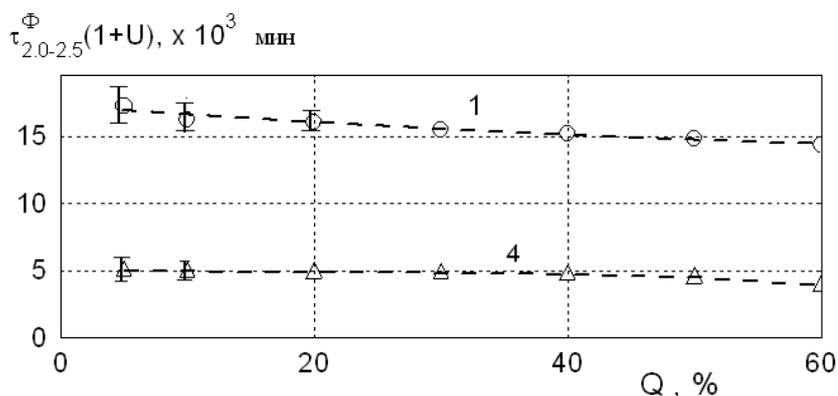


Рис. 7 – Изменение величины фильтрационного вклада $\tau^\phi(t) \cdot (1+U)$ для образцов 1 и 4 в гранулах 2,0÷2,5 мм в зависимости от процентного содержания метана в угле при десорбции.

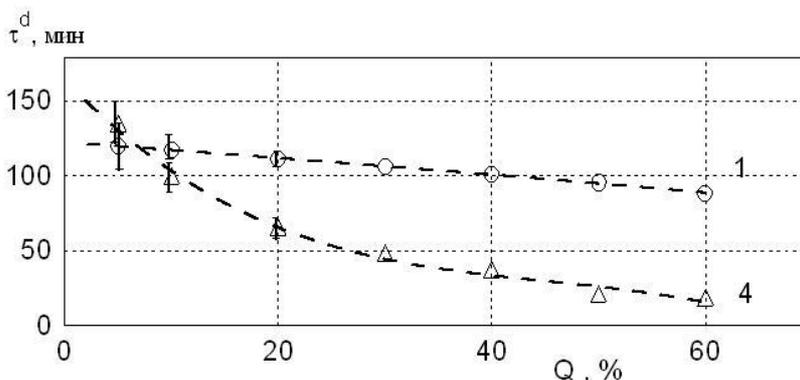


Рис. 8 – Изменение величины характерного времени диффузии τ^d метана из образцов 1 и 4 в зависимости от процентного содержания метана в угле при десорбции.

При обсуждении кинетики десорбции метана в первые минуты её регистрации мы обнаружили, что проницаемость угля в образце 4 в 1,5 раза больше, чем в образце 1. Это может быть связано как с появлением новых каналов фильтрации (открытых пор и трещин) так и с ростом сечения уже существующих. Следуя выражению (8), величина τ^ϕ после пластических деформаций становится меньше. Кроме этого, логично предположить, что пластические деформации сопровождаются частичным «вскрытием» закрытых пор, следствием чего параметр $U(t) = N_{zn}(t)/N_\phi(t)$ для образца 4 становится меньше, чем для образца 1.

Таким образом, уменьшение фильтрационной составляющей десорбции в образце 4 можно связать с изменением проницаемости угля, и, по-видимому, с изменением структуры закрытых пор угля. Обоснованность последнего предположения подтверждается уменьшением сорбционной ёмкости образцов 2-4 и результатами расчёта диффузионной составляющей τ^d характерного времени десорбции τ^{dec} . Рис. 8 иллюстрирует изменение среднего значения характерного времени диффузии метана τ^d по мере истечения газа из образцов угля 1 и 4.

Из рисунка видно, что: а) с ростом уровня шарового тензора среднее значение характерного времени диффузии τ^d метана (через тело микроблоков угля) становится меньше; б) чем меньше метана в угле, тем меньше различие значений τ^d в образцах 1 и 4; оно становится незаметным при $Q \leq 10\%$ от исходного содержания метана.

Уменьшение τ^d логично связать с изменениями в микроструктуре угля, которые произошли в результате действия напряжений. Известно, что в нестационарном диффузионном процессе параметры τ^d , длина l пути диффузии молекул и коэффициент диффузии D связаны соотношением: $\tau^d \sim l^2/D$. При разрушении некоторой части крупных микроблоков их средний размер $\overline{r_{\text{мб}}}$ уменьшается. Логично принять, что и длина пути диффузии это средняя толщина $\overline{\delta}$ тела микроблоков - стенок, отделяющих закрытые поры от фильтрационного объёма, также уменьшается. В этом может быть причина уменьшения $\tau^d \sim \overline{\delta}^2/D$.

Данные рис. 5 можно использовать для оценки соотношения значений $\overline{\delta}$ в образцах 1 и 4. Используя последнее выражение, мы нашли графический вид изменения соотношения δ_1/δ_4 от содержания метана в угле при десорбции (рис. 9).

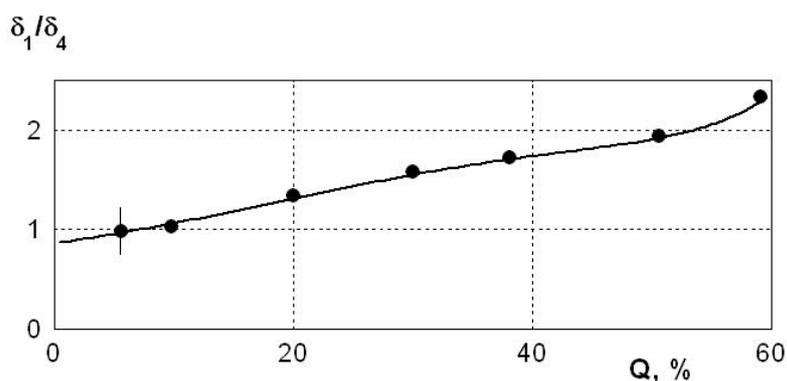


Рис. 9 – Вид корреляции между величиной отношения δ_1/δ_4 и содержанием метана в образцах угля 1 и 4 при десорбции.

Из формулы (1) следует, что в отсутствие фильтрации время выхода газа из угля будет полностью определяться временем диффузии τ^d из угольного микроблока. Длина пути диффузии δ пока не определена, однако можно предположить, что в углях, как и во всех не однородных по плотности и составу материалах, существует её дисперсия. В случае, когда под действием напряжений происходит хрупкое разрушение наиболее крупных микроблоков угля и образуются новые, более мелкие, можно говорить об изменении дисперсии параметра δ , вызванной изменением дисперсии размера микроблоков. Проведем, далее, краткий анализ результатов расчёта значений τ^d с привлечением представления о дисперсии длины пути диффузии δ .

Известно, что истечение газа из мелких блоков происходит быстрее, чем из более крупных. Поэтому при диффузии постепенно будут появляться микроблоки частично или полностью свободные от метана. Это приводит к тому, что диффузия сопровождается увеличением среднего размера «активных» (содер-

жащих метан) микроблоков. Именно поэтому в заключительной фазе десорбции - при малых значениях Q , характерные времена диффузии τ^d в образцах 1 и 4 имеют наибольшие значения.

Результаты расчётов, представленные на рисунках 8 и 9, указывают на то, что в образце 4 дисперсия длины пути диффузии δ больше, чем в образце 1. Из рисунков видно, что, практически, во всём диапазоне значений Q величина параметра τ^d и среднее значение δ для «активных» микроблоков в образце 4 меньше, чем в образце 1. И только лишь в завершающей фазе десорбции мы наблюдаем, что $\delta_1 / \delta_4 \approx 1$. Следует обратить внимание, что в этом случае речь идёт уже о микроблоках наибольшего размера. Очевидно, что, приложив ещё большее напряжение, мы разрушим и уцелевшие крупные микроблоки. О том, как поведёт себя угольное вещество при дальнейшем повышении внешних напряжений сейчас трудно прогнозировать, можно лишь предположить, что окончательное разрушение системы крупных микроблоков и их закрытых пор приведёт к уменьшению сжимаемости угольного вещества.

Выводы.

Эксперимент показывает, что параметры кинетики десорбции метана из угля чувствительны к воздействию различного вида напряжений. Результаты лабораторных исследований дают основание сделать вывод, что высокие уровни напряжения в угольном пласте приводят к необратимым изменениям структуры трещин, открытых и закрытых пор. В частности, установлено, что приложение шарового тензора уровнем 58 МПа вызывает рост фильтрационных характеристик угля, 3-х кратное сокращение времени его дегазации и уменьшение метаноносности угля в 1,5 раза.

В результате проведенных исследований можно сделать одно из предположений относительно существования экстремумов на зависимостях физико-механических свойств углей от глубины и залегания в районе 2000 м. При возрастании уровня шарового тензора (глубин залегания) до 27 МПа происходит разрушение микроблоков угля до определенных размеров, а для того, чтобы разрушить полученные микроблоки необходимо приложить более высокие уровни тензора, отсюда возрастание модулей деформации и сдвига, объемной прочности с возрастанием глубины залегания угольных пластов более 2000 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние вида напряженного состояния на сорбционные свойства углей при их разрушении в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия / В.А. Васильковский, В.Н. Ревва, Е.В. Ульянова и др. // Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2007. -№ 69.
2. Васильковский В.А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля/ В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: Сб.науч.тр. ИФГП НАНУ. – Донецк, 2006. –Вып.9.
3. Васильковский В.А. Некоторые аспекты интерпретации кинетики десорбции метана из каменного угля/ В.А. Васильковский, Е.В.Ульянова // Физико-технические проблемы горного производства: Сб.науч.тр. ИФГП НАНУ. – Донецк, 2006. –Вып.9.
4. Алексеев А.Д. Фазовые состояния и распределение метана в ископаемых углях / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский// Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2008. -№ 73.
5. Васильковский В.А. Метод определения фильтрационной и диффузионной составляющих характерного времени десорбции метана из каменного угля/ В.А. Васильковский// Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2008. - № 1.