УДК 662.831.32

А.Т.КАРМАНСКИЙ, *д-р техн. наук, профессор, karmabox@yandex.ru*
М.Д.ИЛЬИНОВ, *канд. техн. наук, Ilinov_md@spmi.ru*
И.Н.ГИЗАТУЛИНА, *аспирант, инженер, wavy_irishka@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.T.KARMANSKY, *Dr. in eng. sc., professor, karmabox@yandex.ru*
M.D.ILINOV, *PhD in eng. sc., Ilinov_md@spmi.ru*
I.N.GIZATULINA, *post-graduate student, engineer, wavy_irishka@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕЙ С УЧЕТОМ ФАЗОВО-ФИЗИЧЕСКОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Приведены результаты исследований динамики изменения физических и механических свойств вмещающих осадочных пород и каменных углей Кузбасса и Воркутского месторождения. Получено общее условие изменения коэффициента проницаемости по газу в зависимости от форм и видов связи влаги в породах и интенсивности напряженного состояния. При решении проблемы извлечения метана представляют интерес методологические вопросы изучения процессов сорбции-десорбции в природных газонасыщенных углях. Изучение сорбционных характеристик угля показало, что его сорбционная способность зависит от стадии метаморфизма во всем исследованном диапазоне давлений насыщения.

***Ключевые слова*:** месторождения каменного угля (Кузбасс, Воркутское месторождение), напряженно-деформированное состояние, коэффициент проницаемости, поровое давление, сорбционная способность.

LABORATORY RESEARCHES OF FILTER-CAPACITY PARAMETERS OF COAL WITH DUE ACCOUNT OF PHASE-PHYSICAL CONDITION AND STRESS-STRAIN STATE

The Article contains the results of researches of dynamics in changes of physical and mechanical properties of enclosing sedimentary rocks and hard coals of the Kuzbass and Vorkutsk deposits. The general condition of change in permeability factor on gas was obtained, depending on forms and types of moisture bonds in rocks and intensity of stress state. In the research tasks necessary for solving the problem of methane extraction, the methodological aspects are a matter of interest to study the processes of sorption-desorption in natural gas-saturated coals. Study of the sorption characteristics of coal has shown that its sorption capacity depends on the stage of metamorphism within the whole studied range of saturation pressures.

***Key words*:** hard coals of the Kuzbass and Vorkutskoe deposits, stress-strain state, permeability factor, pore pressure, sorption capacity.

Современные инновационные технологии в области разработки полезных ископаемых, направленные, главным образом, на интенсификацию выемки полезного ископаемого, оказывают существенное влияние на характер и параметры геомеханических процессов, протекающих в породном массиве. Прогнозирование этих процессов и пре-

дотвращение их негативного влияния на безопасность и экономическую эффективность выемки полезных ископаемых неразрывно связано с изучением физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород.

Исследования динамики изменения физических и механических свойств горных пород можно разделить на три основных направления:

• изучение изменений механических свойств, вызванных интенсивностью изменения напряженного состояния, формами и видами влаги в породах, поровым давлением. Это направление можно рассматривать как исследование изменения механических свойств пород при техногенном воздействии при разработке месторождений, постройке крупных инженерно-технических сооружений;

• изучение процессов изменения физических свойств (пористости, сжимаемости, проницаемости), вызванных перечисленными факторами при постоянной скорости деформирования. Современная геодинамическая активность массива пород контролируется зонами тектонических нарушений, имеющих повышенную трещиноватость. Деформационные процессы в них имеют параметрическую природу. В связи с этим возникает необходимость выявления физических закономерностей формирования этих процессов;

• изучение процессов изменения механических свойств, вызванных интенсивностью изменения напряженного состояния, процессами сорбции и десорбции метана, формами и видами влаги в породах, поровым давлением.

Объектом исследований являлись осадочные породы (крепкие и средней прочности), каменные угли (Кузбасс, Воркутское месторождение), отличающиеся характером разрушения (пластическим или хрупким), низкой растворимостью и различием форм связи воды с поверхностью породы.

В качестве основного принципа принят комплексный метод исследований, рассматривающий структуру, свойства, состояние породы и условия нагружения как единую взаимосвязанную систему.

Зависимости механических характеристик горных пород от влажности в координатах $\tau - W$ (здесь W – весовая влажность) носят экспоненциальный характер (рис.1, *а*, 2, *а*), в координатах $\ln\tau - G$ апроксимируются прямыми линиями, где $G = W_{вес}/W_{н}$ – относительная влажность. Максимальное снижение прочности пород (до 70 % от общего уровня снижения прочности) соответствует максимальной гигроскопической влажности (точка излома кривых на рис.2, *а*).

Дальнейший анализ зависимостей механических характеристик горных пород от влажности и вида напряженного состояния (условий предельного состояния) проведен с использованием системы координат $\ln\tau - C$, где $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ – максимальное касательное напряжение (в дальнейшем предел прочности); $C = \sigma_3/\sigma_1$ – параметр интенсивности напряженного состояния; $\sigma_2 = \sigma_3$ – давление всестороннего сжатия [3] (рис.3, 4)

Условия предельных состояний в принятой системе координат, учитывающие интенсивность напряженного состояния, поровое давление при определенном уровне влажности можно представить уравнением вида

$$\tau = \tau_0(G)\exp\left[(A - ka)C\right], \qquad (1)$$

где $\tau_o(G)$ – прочность на одноосное сжатие образца в воздушно-сухом состоянии; $a = P_п/\ \sigma_3$ – коэффициент, изменяющийся в пределах от 0 до 1; $P_п$ – поровое давление насыщающей жидкости; k – постоянная для данной породы, определяющая угол наклона экспериментальных зависимостей $\tau_n^i - P_n^i$.

Полное условие предельного состояния, учитывающее влажность G, поровое давление насыщающей жидкости $P_п$, интенсивность напряженного состояния C можно представить уравнением [1]

$$\tau = \tau_0(G)\exp\left[(A - ka)C - zG\right], \qquad (2)$$

где z – постоянная, определяющая угол наклона линии предела прочности к оси C.

Условие предельных состояний, представленное уравнением (2), является критерием разрушения пород в зависимости от форм связи влаги с породой, величины порового давления и интенсивности напряженного состояния.

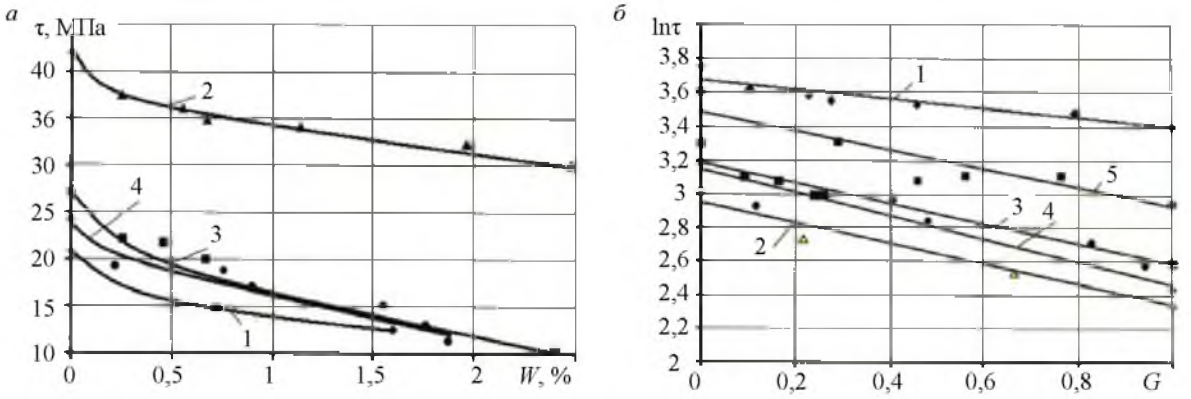


Рис.1. Зависимость прочности песчаника пористостью $m \leq 3$ % от влажности

1 – карбонатизированный, тонкозернистый; 2 – карбонатизированный, неравнозернистый; 3 – карбонатизированный, среднезернистый; 4 – мелкозернистый

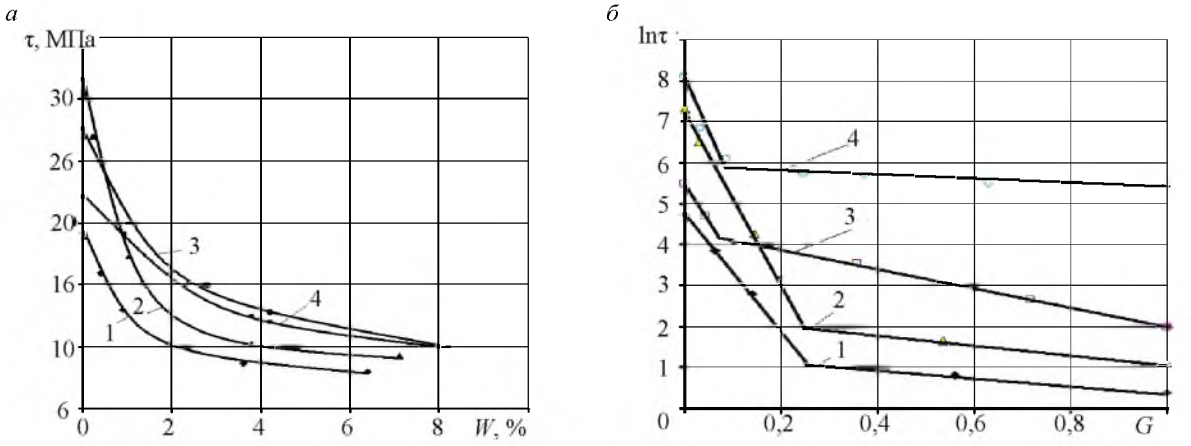


Рис.2. Зависимость прочности пород пористостью $m > 3$ % от влажности

1 – алевролит крупнозернистый; 2 – алевролит углистый; 3 – аргиллит микрослоистый; 4 – аргиллит (текстура близка к микрослоистой)

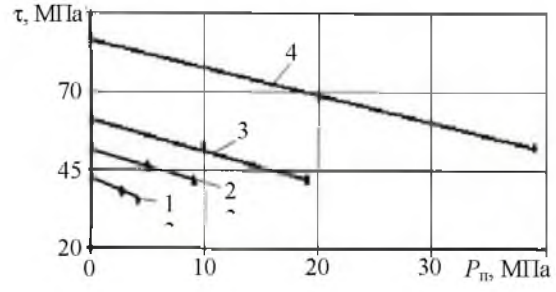


Рис.3. Зависимость прочности угля (Кузбасс) от влажности и порового давления, создаваемого водой, при сложном напряженном состоянии

1 – σ_3 = 5 МПа; 2 – σ_3 =10 МПа; 3 – σ_3 = 20 МПа; 4 – σ_3 = 40 МПа

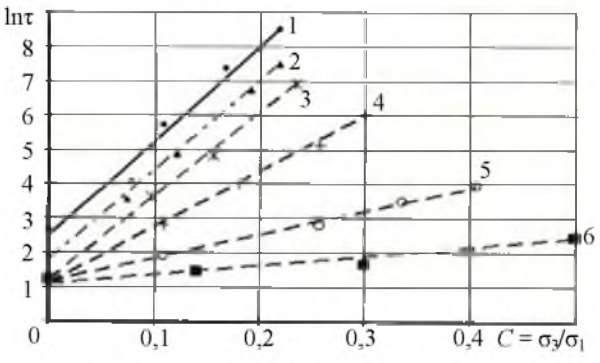


Рис.4. Паспорт прочности (кварцевый песчаник) от влажности и порового давления при сложном напряженном состоянии

1 – воздушно-сухие; 2 – гигроскопическая влажность; 3 – полное водонасыщение; 4 – $a = P_п/\sigma_3 = 0,5$; 5 – $a = 0,8$; 6 – $a = 0,95$

Проведенные исследования позволили выявить закономерности изменения коэффициента проницаемости K углей и пород от интенсивности напряженного состояния и форм связи влаги с породой. Из анализа результатов исследований видно, что при разных уровнях влажности и фиксированных значениях σ_3 характер изменения коэффициента проницаемости с ростом осевой нагрузки до предела прочности одинаков (рис.5, 6). При всех уровнях влажности с ростом осевой нагрузки $\Delta\sigma_1$ до предела упругости коэффициент проницаемости уменьшается. На пределе прочности и в запредельной области деформирования коэффициент проницаемости резко возрастает, достигая значения проницаемости, соответствующего начальной величине коэффициента проницаемости при данном σ_3, а при низких давлениях всестороннего сжатия $\sigma_3 = 2{,}5$ МПа и $\sigma_3 = 5$ МПа превышает его в 1,5-2 раза.

Экспериментально получено общее условие изменения коэффициента проницаемости по газу в зависимости от форм и видов связи влаги в породах и интенсивности напряженного состояния. Установленная закономерность изменения проницаемости от давления всестороннего сжатия связана с характером деформирования пород с различным типом структуры порового пространства. С ростом давления всестороннего сжатия в первую очередь закрываются трещины, деформация скелета менее значительна, что регистрируется по коэффициентам проницаемости и объемной сжимаемости.

Обобщенное уравнение зависимости коэффициента проницаемости от вида напряженного состояния и уровней влажности пород можно представить в виде [5]

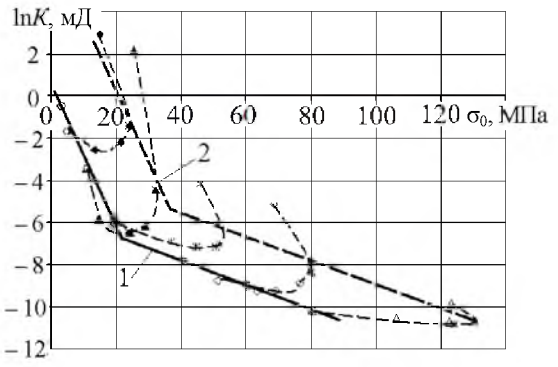


Рис.5. Проницаемость угля (Кузбасс)
1 – при всестороннем сжатии; 2 – на пределе прочности

$$K_{\text{пр}}\left(\sigma_2\Delta\sigma_1^{\,i},G\right)=K_0\exp\left[-\left(\alpha_0+k\sigma_2\right)G\right]+$$

$$+a_0\exp(-\beta\sigma_3)\frac{\Delta\sigma_1^{\,i}}{3},$$

где первое слагаемое представляет собой зависимость коэффициента проницаемости от давления всестороннего сжатия, а второе – приращение коэффициента проницаемости от действия дифференциального напряжения $\Delta\sigma_1^i$, которое определяется при заданном уровне влажности; $\sigma_0=\frac{\Delta\sigma_1^i}{3}+\sigma_3$ – среднее нормальное напряжение при заданном уровне $\sigma_3 = \text{const}$.

Возрастающая роль и актуальность вопроса оценки достоверности определения метанового потенциала (МП) угольных месторождений (шахт) очевидна. Для действующих и проектируемых угольных шахт в

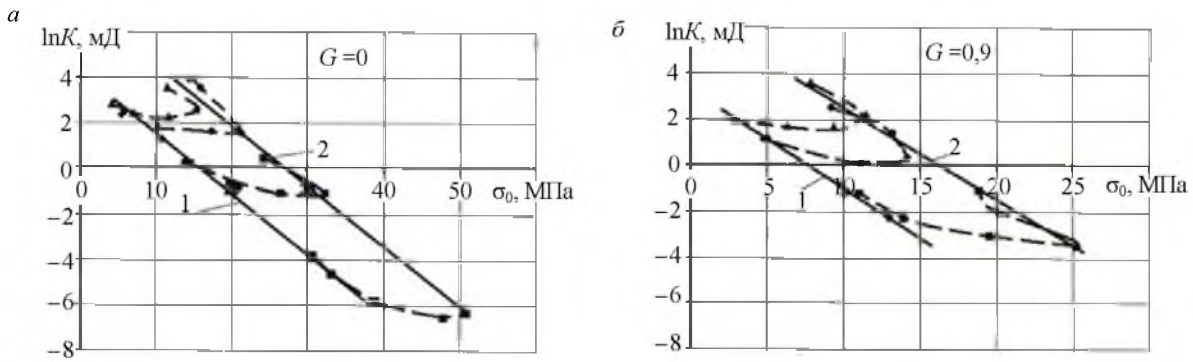


Рис.6. Проницаемость угля (Воркута) при $G = 0$ (*а*) и $G = 0{,}9$ (*б*)
1 – при всестороннем сжатии; 2 – на пределе прочности

соответствии с МП разрабатываются меры по обеспечению безопасности работ и определяются технологические, экономически обоснованные способы каптирования и утилизации метана, который сопутствует процессам добычи угля [1, 6, 7]. Для разработки перспективных способов добычи метана и мероприятий предварительной дегазации скважинами, пробуренными с поверхности, целесообразность определения МП того или иного района диктуется экономическими соображениями.

Метановый потенциал угольного месторождения – это количество метана, приведенное к нормальным условиям, которое может выделиться из угленосного массива при полной его разгрузке от геостатического давления на данной площади в рассматриваемом диапазоне глубин. МП выражается в абсолютных или относительных единицах. Относительные единицы МП выражают удельное количество метана, которое может выделиться на тонну горючей массы рассматриваемой части массива (тонну добываемого угля) или на квадратный метр его площади.

Методика расчета МП довольно проста. МП равен сумме произведений мощности i-го пласта, его метаноносности, пластовой зольности, удельной массы горючего вещества и площади пласта на рассматриваемом участке всех i-х потенциальных источников метана в принятом к расчету диапазоне глубин. Для решения проблемы извлечения метана представляют интерес методологические вопросы изучения процессов сорбции-десорбции в природных газонасыщенных углях.

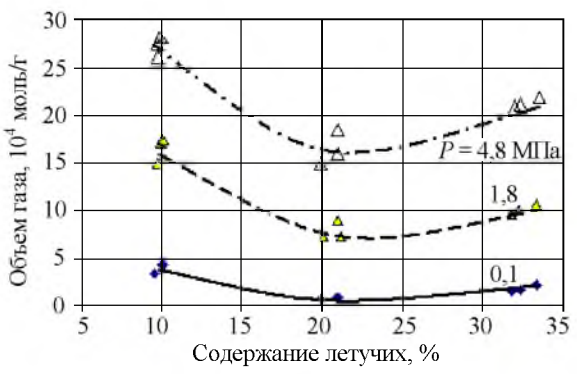


Рис.7. Зависимость сорбции метана от содержания летучих в угле и давления насыщения P

Решение этой задачи требует обоснования и разработки методов воздействия на угольный массив, способных привести к возникновению в угле достаточно интенсивных потоков содержащегося в нем метана к вскрытым участкам массива, например, к пробуренным в нем скважинам, из которых метан можно было бы извлекать в виде свободного газа.

Адсорбция – термин, описывающий существование более высокой концентрации адсорбированного газа (адсорбата) в непосредственной близости от твердого тела, чем концентрация свободного газа. Явление зависит от природы газа или поверхности и может принимать две формы: физическую или химическую в зависимости от природы сил связи. Химическая адсорбция обусловлена существованием химической связи между внешними слоями атомов адсорбента и адсорбата. Физическая адсорбция – результат действия межмолекулярных сил большого радиуса действия между двумя фазами. Она сравнительно слаба и легко обратима.

Третья возможность – существование сжатой свободной газовой фазы в пористой структуре твердого тела. В некоторых литературных источниках эту категорию включают в общий термин сорбция.

Категория сорбции, включенная в какую-либо определенную систему, зависит прежде всего от природы твердого тела и в меньшей степени от природы газа. При определении адсорбции очень важна площадь поверхности тела, включающая наружную и внутреннюю поверхности пористых тел или ячеистых адсорбентов. Внутренняя поверхность более пористых тел часто на несколько порядков больше внешней. В общем, чем больше поверхность, тем большую роль в общем сорбционном процессе играет адсорбция и сжатие свободного газа.

Уравнение для адсорбции газов имеет вид

$$Q = f(P,T),$$

где Q – количество адсорбированного газа на единицу массы твердого тела; P и T – давление и температура. Один из трех факторов можно принять постоянным и изучать влияние одной переменной на другую.

Основная зависимость – это влияние давления на количество адсорбированного газа при постоянной температуре. Полученная кривая называется изотермой адсорбции при переменной Q или изобарой при переменной T [2].

Ленгмюр развил эту основную зависимость на прочной термодинамической основе. Другие модели – это изотермы классическая или Фрейндлиха, а также Брюнауэра, Эмметта и Теллера учитывают полимолекулярные слои адсорбата на адсорбате, в то время как Ленгмюрова модель рассматривает только мономолекулярный слой. При давлениях и температурах метана, которые присутствуют в угле, наиболее пригодной оказывается Ленгмюрова модель.

Как показывают результаты исследований (рис.7), сорбционная способность угля зависит от стадии метаморфизма во всем исследованном диапазоне давлений насыщения. Она минимальна при содержании летучих около 20 %. При их содержании более 20 % сорбционная способность угля возрастает незначительно [4].

Выводы

1. Условие предельных состояний, представленное уравнением (2), является критерием разрушения пород в зависимости от форм связи влаги с породой, величины порового давления и интенсивности напряженного состояния.

2. Экспериментально получено общее условие зависимости коэффициента проницаемости от вида напряженного состояния и уровней влажности пород и угля.

3. Отработана методика проведения эксперимента для определения сорбционной способности углей, изготовлена установка для сорбции и десорбции метана в образцах угля, проведены исследования сорбционных характеристик угля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Айруни А.Т.* Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. М., 1987. 300 с.

2. *Грег С.* Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость / С.Грег, К.Синг. М., 1970. 406 с.

3. *Карманский А.Т.* Закономерности изменения прочностных свойств пород при сложном напряженном состоянии, разных уровнях влажности и порового давления // Записки Горного института, СПб, 2009. Т.183. С.293-296.

4. *Карманский А.Т.* Исследование механизма десорбции метана при насыщении угля диоксидом углерода // Записки Горного института, СПб, 2009.Т.183. С.285-288.

5. *Карманский А.Т.* Коллекторские свойства горных пород при изменении вида напряженного состояния // Записки Горного института, СПб, 2009. Т.183. С.289-292.

6. *Трубецкой К.Н.* Научные и организационно-методические аспекты промышленного извлечения (добычи) метана угольных пластов / К.Н.Трубецкой, В.В.Гурьянов // Уголь. 2005. № 11, С.53-56.

7. *Эттингер И.Л.* О запасе свободной энергии в газонасыщенных угольных пластах / И.Л.Эттингер, Н.В.Шульман, М.И.Большинский // Уголь. 1980. № 7. С.11-13.

REFERENCES

1. *Airuni A.T.* Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena at coal mines. Moscow, 1987. 300 p.

2. *Greg S., Sing K.* Adsorption. Specific surface. Porosity. Moscow, 1970. 406 p.

3. *Karmansky A.T.* Regularities of changes in strength properties of rocks under complicated stress state , different levels of moisture content and pore pressure // Proceedings Mining Institute. Saint Peterburg, 2009. Vol.183, P.293-296.

4. *Karmansky A.T.* Study of mechanism of methane desorption in coal saturation with carbon dioxide. Proceedings Mining Institute. Saint Peterburg, 2009. Vol.183, P.285-288.

5. *Karmansky A.T.* Reservoir properties of rocks in change of stress state type. Proceedings Mining Institute. Saint Peterburg, 2009. Vol.183, P.289-292.

6. *Trubetskoy K.N., Guryanov V.V.* Scientific research and methodological aspects of industrial extraction (production) of methane from coal seams// Ugol, 2005, N 11, P.53-56.

7. *Ettinger I.L., Shulman N.V., Bolshinsky M.*I. On the reserve of free energy in gas-saturated coal seams // Ugol, 1980. N 7. P.11-13.