

18. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.
19. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. Мир, 1979. – 392 с.
20. Connor J.J., Brebbia C.A. Finite Element Techniques for Fluid Flow. – London-Boston. Newnes-Butterworths, 1977. – 264 p.
21. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. В.А. Постнов, С.А. Дмитриев, Б.К.Елтышев, А.А.Родионов. - Л.: Судостроение, 1979. - 287 с.
22. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М.: Высшая школа, 1990. - 400 с.
23. Шевелев Г.А. Метаноємкость песчаников, вмещающих угольные пласты. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 204-207.
24. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1999, №5. – с. 13-18.
25. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №6. – с. 47-55.
26. Садохин В.П., Жирнова Т.С., Кудряшова В.Д. Фильтрация метана в подготовительные выработки, проводимые по мощным угольным пластам. – В кн.: Борьба с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах. – Кемерово, 1973. – с. 5-23 (ВостНИИ).
27. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. – К. Наук. Думка, 1981. – 284 с.
28. Круковский А.П., Круковская В.В. Учет напряженно-деформированного состояния углепородного массива при расчете фильтрации газа в зоне влияния очистной выработки. – В сб.: Геотехническая механика, № 50.– Днепропетровск, 2004.
29. Лукинов В.В., Клец А.П., Ильюшенко В.Г. и др. Методика расчета извлекаемых запасов метана из подработанного и надработанного углепородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 37. – Днепропетровск, 2002. – с. 62-69.

УДК 622.234.5(088.8)

В.Г. Золотин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ СВЯЗИ ВОДЫ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМ УГЛЕМ³

На основі термографічного методу дослідження енергії зв'язку води з поверхню диспергованого вугілля підтверджено можливість створення навколо присвердловинної зони непроникливого для води та газу шару, що є причиною кольматації.

DEFINITION OF A POWER LEVEL OF CONNECTION OF WATER WITH DESTROYED COAL

On the basis of a thermal and graphic method of research of energy of connection of water with a surface destroyed coal the opportunity of formation of a zone around of a chink, impenetrable for water and gas is confirmed

В процессе гидродинамического воздействия на газонасыщенные угольные пласты происходит интенсивное разрушение угля, вследствие чего через его трещиновато-пористую структуру после некоторого числа рабочих циклов фильтруется не чистая вода, а суспензия, содержащая значительное количество угольных и породных частиц, что делает процесс гораздо более сложным, чем классическая фильтрация жидкости через пористое тело.

Движение суспензии через уголь прискважинной зоны приводит к посте-

³ - работа выполнена под научным руководством доктора технических наук, профессора Софийского К.К.

пенной кольматации фильтрационного пространства (заиливанию макропор и трещин мелкими угольными и породными частицами), ухудшению коллекторских свойств угольного массива и образованию непроницаемого для метана водоуглепородного слоя.

Целью настоящей работы является исследование условий образования такого слоя и его энергетическая составляющая, обуславливающая возможность фильтрации через него водоуглепородной суспензии и проникновения в более глубокие части угольного пласта, а также возможность выхода газа в выработку в процессе ведения горных работ, в частности, при проведении подготовительных выработок.

Определение энергии связи воды с поверхностью дисперсных угольных частиц позволяет установить энергетический уровень системы «вода-уголь-порода» в зависимости от фракционного состава твердой фазы в фильтруемой суспензии. Определение видов влаги, связанной с поверхностью дисперсных частиц, возможно с помощью термографического метода анализа изменения массы, температуры и определения энергии связи влаги с углем в процессе его сушки.

Основой метода определения энергии связи различных видов влаги с угольно-породным шламом послужили исследования закономерностей процесса сушки. Особенности процесса сушки влажных пористых материалов выявляются достаточно четко на кривых сушки (графическая зависимость между влажностью материала и временем сушки) и температурных кривых (графическая зависимость между температурой материала и временем сушки или его влагосодержанием).

На основе совместного анализа кривых сушки и температурных кривых весь процесс сушки делят на два периода – постоянной и падающей скорости. Влагосодержание, соответствующее переходу первого периода во второй, называется критическим. Температура материала в процессе сушки в первом периоде при мягких режимах сушки равна температуре мокрого термометра, во втором периоде температура тела непрерывно повышается, приближаясь к температуре окружающей среды. Количество испаренной жидкости в единицу времени с единицы открытой поверхности пористого тела в первом и во втором периодах не равны при одинаковом режиме сушки и одинаковых определяющих размерах [1].

При сушке малых образцов пористых материалов в мягких режимах коэффициенты тепло- и массообмена могут быть приближенно приняты равными в первом и втором периоде сушки, а температура и влагосодержание на поверхности и внутри образца в каждый момент сушки одинаковыми (квазиравновесное состояние) [2, 3].

Термографический метод анализа видов связи влаги с пористым материалом позволяет по сингулярным точкам на термограммах изотермической сушки характеризовать кинетику последовательного удаления влаги различных видов, а также характеризовать энергетическую сторону процесса испарения влаги с помощью энергограмм [4].

Расчет энергии связи влаги с углем осуществляется по экспериментальным данным сушки путем внешнего обогрева малого образца угля [5, 6]. Соотношение масс высушиваемого образца и теплоносителя подобрано таким образом, чтобы тепло- и массообмен происходили при постоянном тепловом потоке. Это достигается при сушке образца массой 500 мг на чашечке торсионных весов в сушильной камере объемом 27 литров.

Температура воздуха в течение опыта ($T=368^{\circ}\text{K}$) поддерживается постоянной, что обеспечивает режим сушки, при котором коэффициенты тепло- и массопередачи одинаковы в обоих периодах сушки.

Во время опыта, продолжающегося 25-30 мин, фиксируются ежеминутно убыль веса по циферблату торсионных весов и температура в образце, определяемая параллельно с помощью термистерного датчика. В каждый отрезок времени определяются влагосодержание угля и энергия связи с ним влаги. Расчет энергии связи осуществляется следующим образом.

Тепло ΔH , подводимое к обводненному образцу в процессе изотермической сушки за время $\Delta\tau$, расходуется на нагревание, испарение воды и разрыв связи влаги с материалом.

Так как условия опыта предполагают равенство тепловых потоков в каждый отрезок времени на протяжении всей сушки, то на основании уравнения теплового баланса, получим:

$$\left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_1 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_1 = \left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_2 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_2 + \left(q \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_2, \quad (1)$$

откуда

$$q = \frac{\left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_1 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_1 - \left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_2 - \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_2}{\left(\frac{\Delta m}{\Delta \tau} \right)_2}, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/кг·град; m – масса образца, кг.; $\frac{\Delta T}{\Delta \tau}$ – прирост температуры образца за время $\Delta\tau$, град; h – удельная теплота испарения свободной воды при температуре опыта, Дж/кг; $\frac{\Delta m}{\Delta \tau}$ – количество испаренной воды за время $\Delta\tau$, кг; q – энергия связи воды с углем, Дж/кг.

Величины энергии связи воды с углем представлены на графике (рис. 1).

Так как изменение энергий связи происходят в большом диапазоне, графики строились в полулогарифмических координатах. На рис. 1 представлена энергограмма сушки угольного образца класса менее 0,5 мм, имеющая характерные участки.

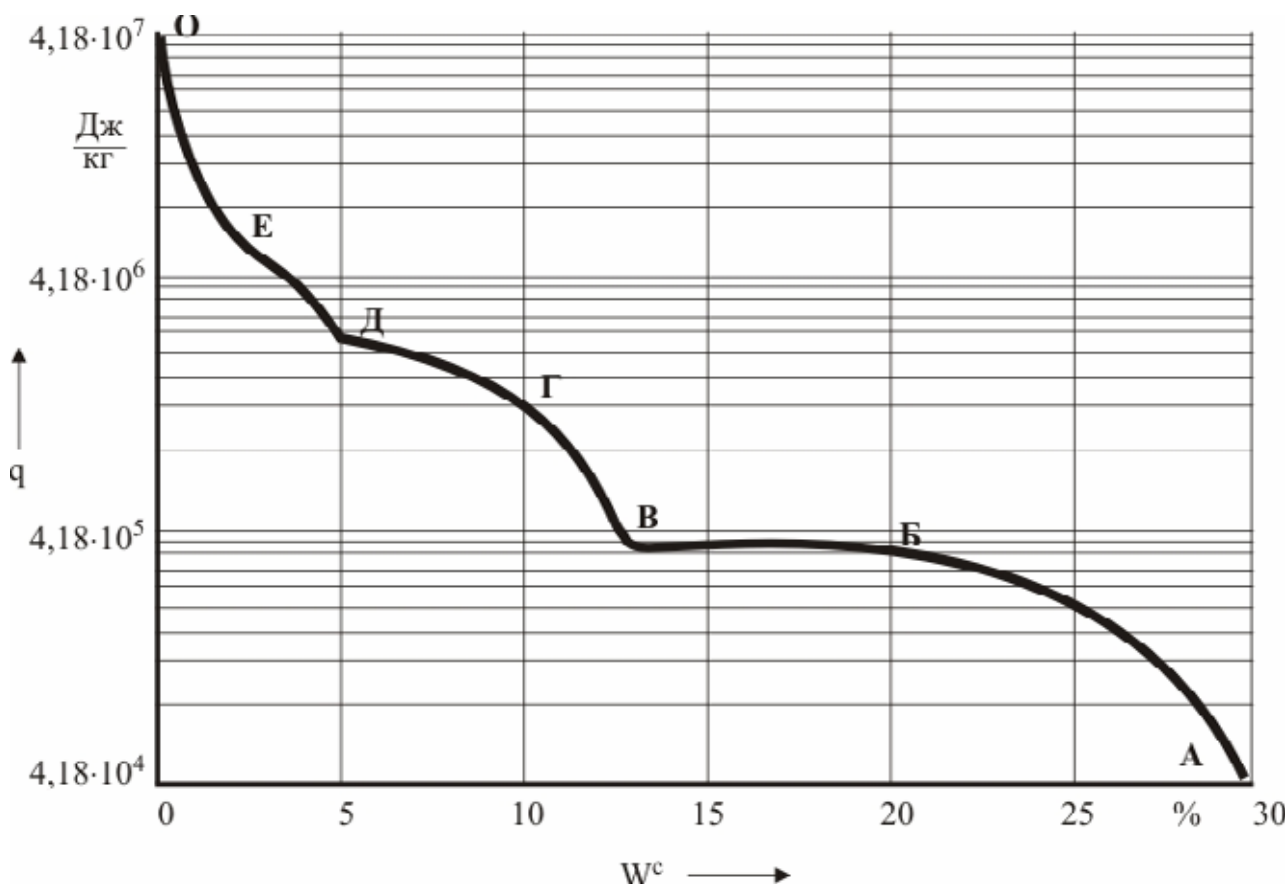


Рис. 1 – Зависимость энергии связи воды с углем от влагосодержания, класс < 0,5 мм

Как видно из рис. 1, по мере удаления влаги из макрокапилляров (сначала из крупных, затем из более мелких) энергия связи быстро возрастает (участок АБ). Горизонтальный участок (БВ) соответствует удалению более или менее однородной по характеру взаимодействия стыковой влаги на одном энергетическом уровне. Далее следует удаление адгезионной влаги (ВГ), более прочно связанной с внешней поверхностью угля. Подъем энергограммы по мере утончения адгезионной пленки и соответствующего этому повышению энергии взаимодействия. Так как уголь является микропористым телом, то удаление влаги из микропор происходит при повышенных энергиях, соответствующих энергиям капиллярной формы связи при диаметре капилляра менее 10^{-7} м (участок кривой ГД). Наибольшей энергией связи обладает адсорбционная влага, имеющая два энергетических участка – полимолекулярной (ДЕ) и мономолекулярной (ЕО) адсорбции.

Таким образом, энергограмма позволяет установить величину энергии связи для различных видов влаги и проследить переход одних видов влаги в другие.

Совместные графики кривых сушки, термограмм и энергограмм сушки угля различной крупности, построенных в зависимости от времени сушки, представлены на рисунках 2-7.

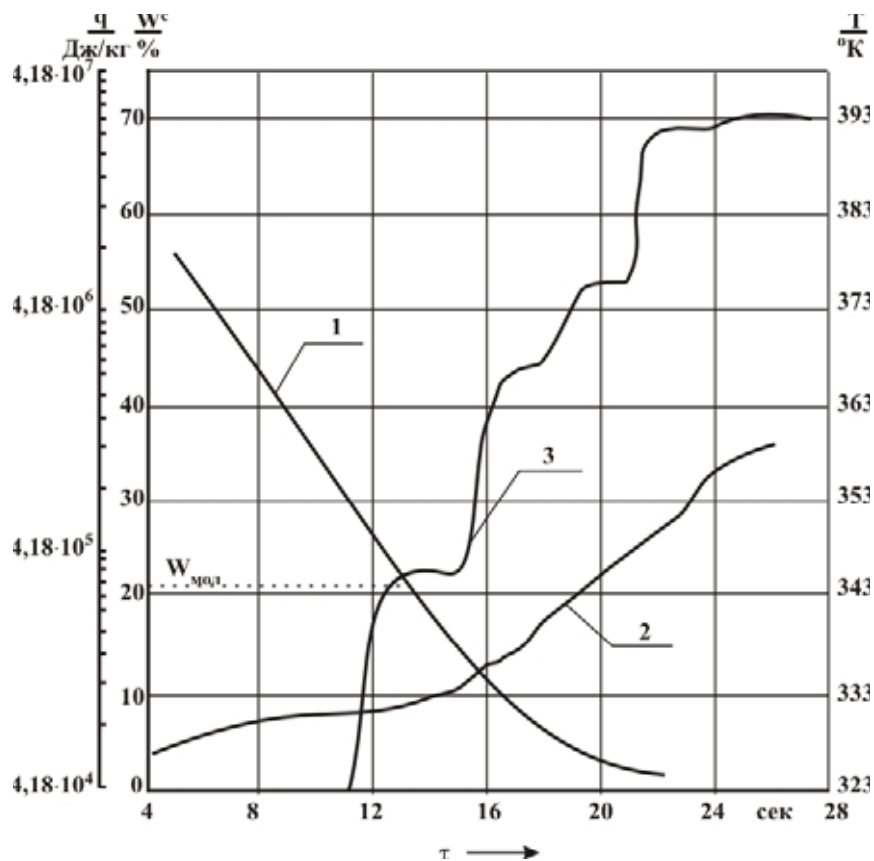


Рис. 2 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса < 0,5 мм
 $W_{\text{мол}} = 21,8 \%$

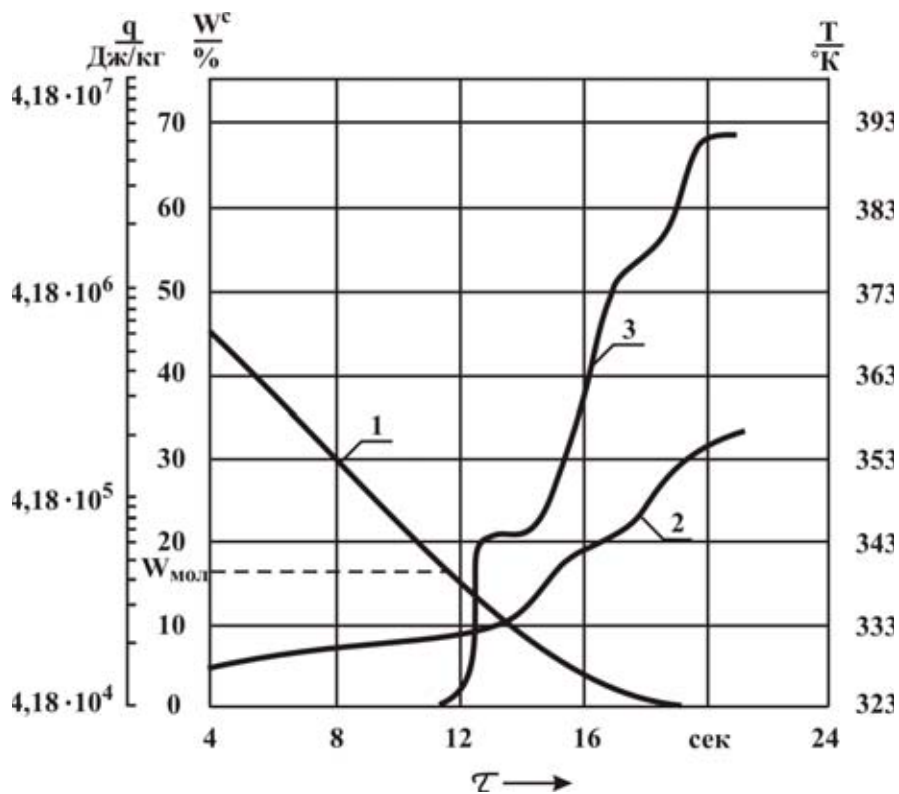


Рис. 3 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса 0,5-0,16 мм
 $W_{\text{мол}} = 16,4 \%$

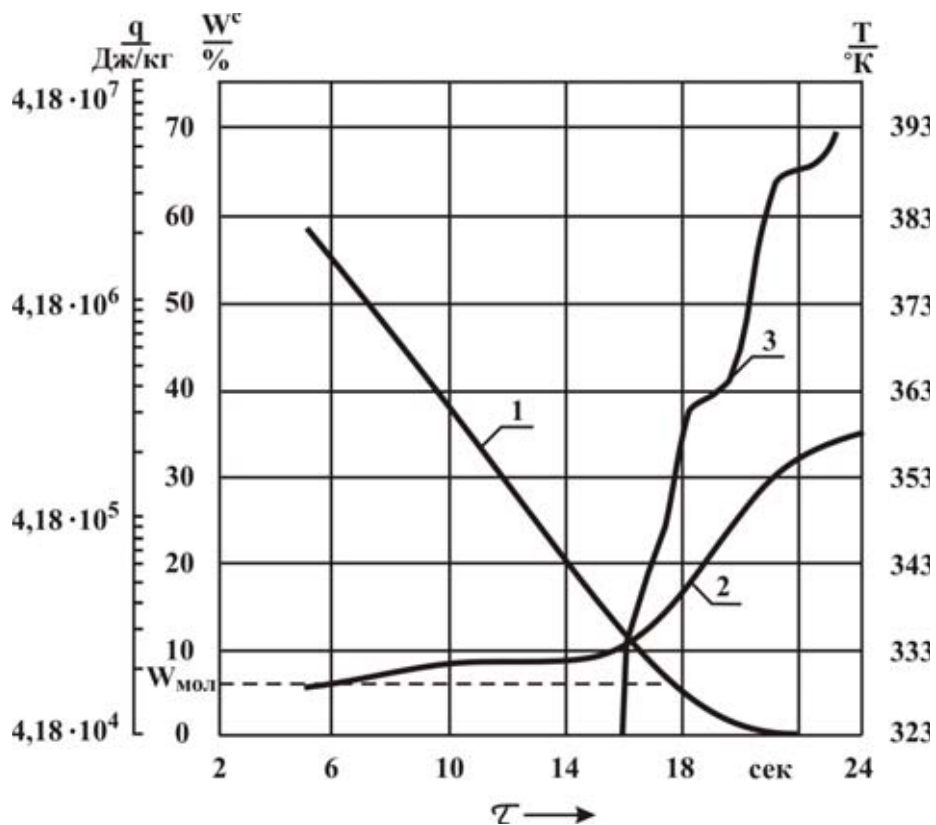


Рис. 4 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса 0,16-0,25 мм
 $W_{\text{мол}} = 5,8\%$

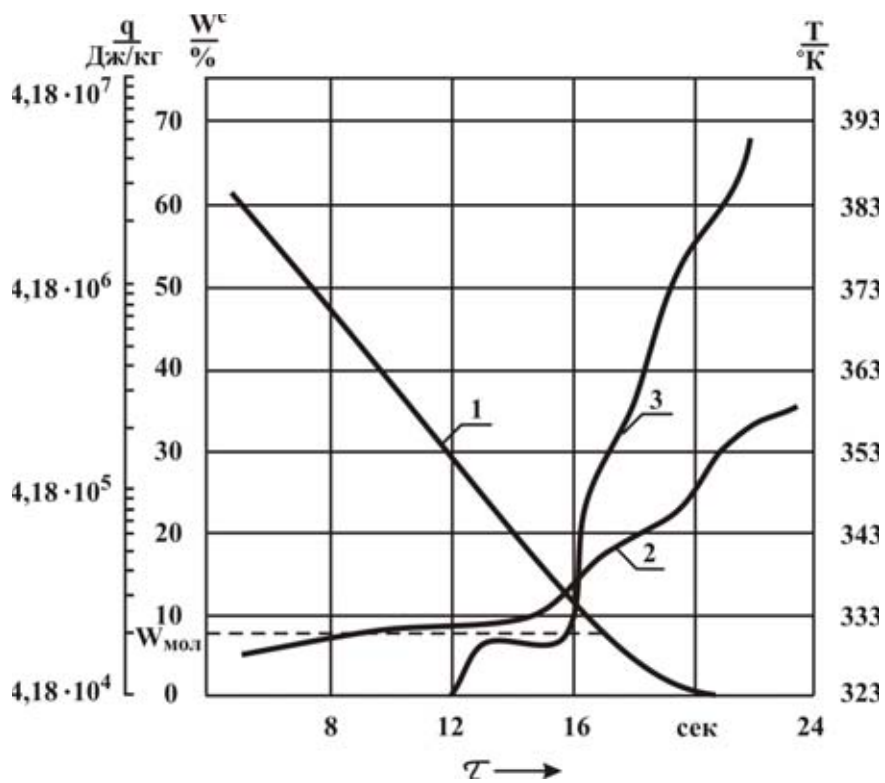


Рис. 5 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса 0,16-0,08 мм
 $W_{\text{мол}} = 7,6\%$

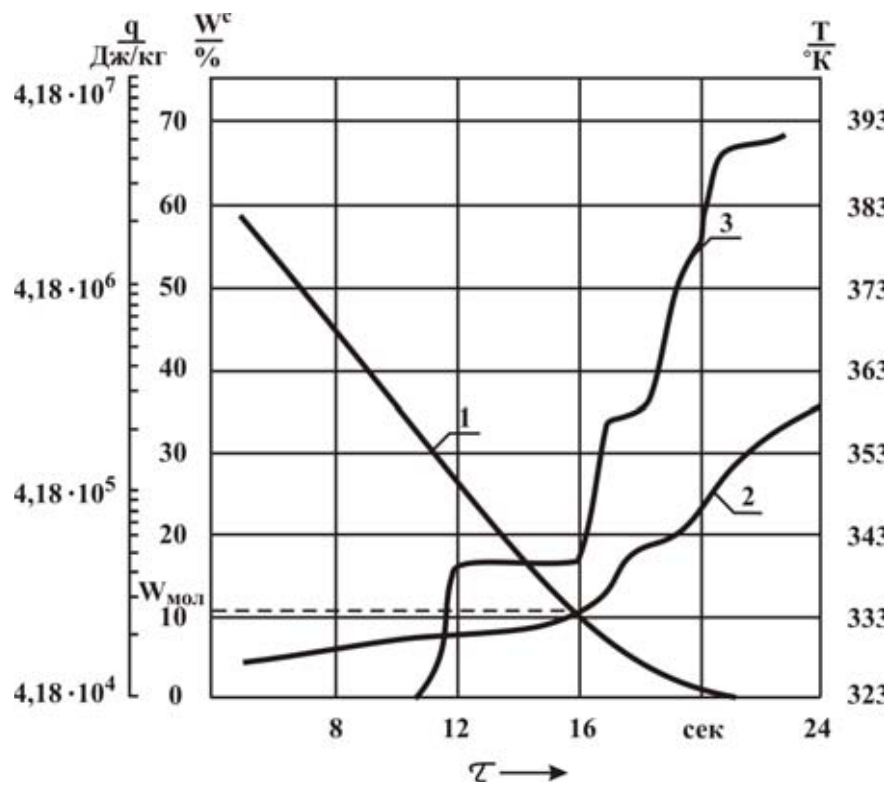


Рис. 6 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса 0,08-0,04 мм
 $W_{\text{мол}} = 11,1\%$

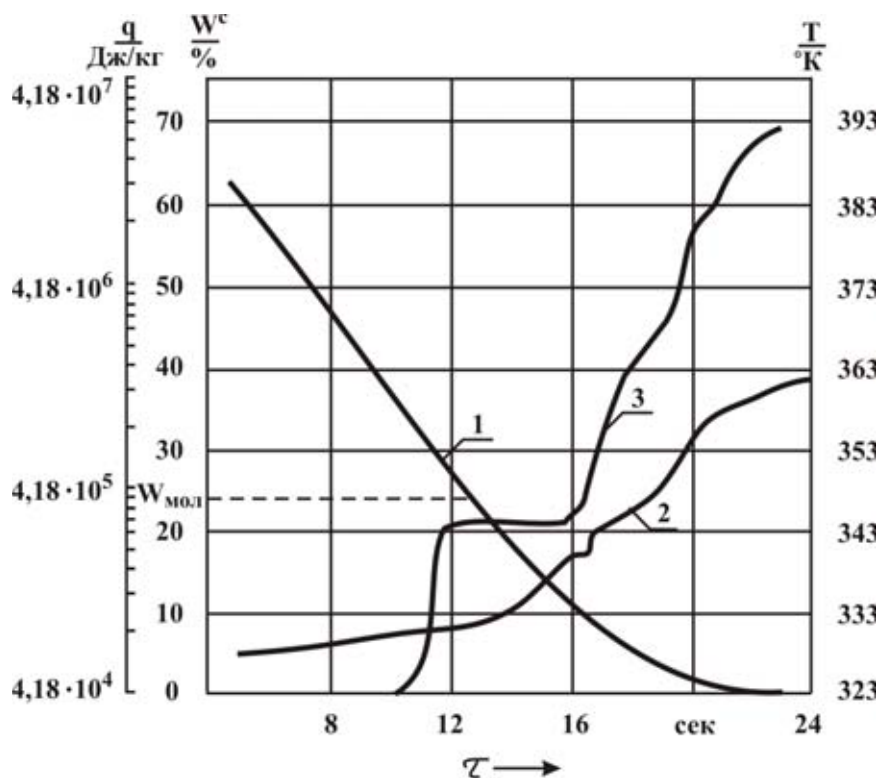


Рис. 7 – Кривая сушки (1), термограмма (2), энергограмма (3) угля класса $<0,04$ мм,
 $W_{\text{мол}} = 24,5\%$

На термограммах сушки наблюдаются характерные точки, позволяющие

разграничить удаление различных видов влаги. Температура мокрого термометра, при которой удаляется свободная вода в предлагаемых условиях сушки, равна 329°K. Начало удаления каждого из видов влаги сопровождается подъемом температуры образца. Наиболее четкое разграничение видов влаги наблюдается на энергограммах сушки. Выход на каждый последующий энергетический уровень требует соответствующего повышения температуры, и каждый из видов влаги в предлагаемых условиях удаляется в определенном интервале температур: при 330-331°K удаляется капиллярно-промежуточная влага, от 331-336°K – стыковая; от 336 до 341°K – адгезионная. от 341 до 348°K – влага микропор, от 348 до 353°K – влага полимолекулярной адсорбции и от 353 до 358°K – мономолекулярный слой. При удалении влаги мономолекулярной адсорбции на энергограммах материалов, имеющих достаточно большую общую удельную поверхность, наблюдается характерный горизонтальный участок, свидетельствующий об удалении этого вида влаги на одном энергетическом уровне.

Кривые энергии связи, построенные в зависимости от влагосодержания исследуемого образца, позволяют определить величину энергии, необходимую для удаления воды при заданной глубине обезвоживания без построения кривых сушки и термограмм, а также выявить некоторые закономерности удаления влаги из материалов различной крупности (рис. 8).

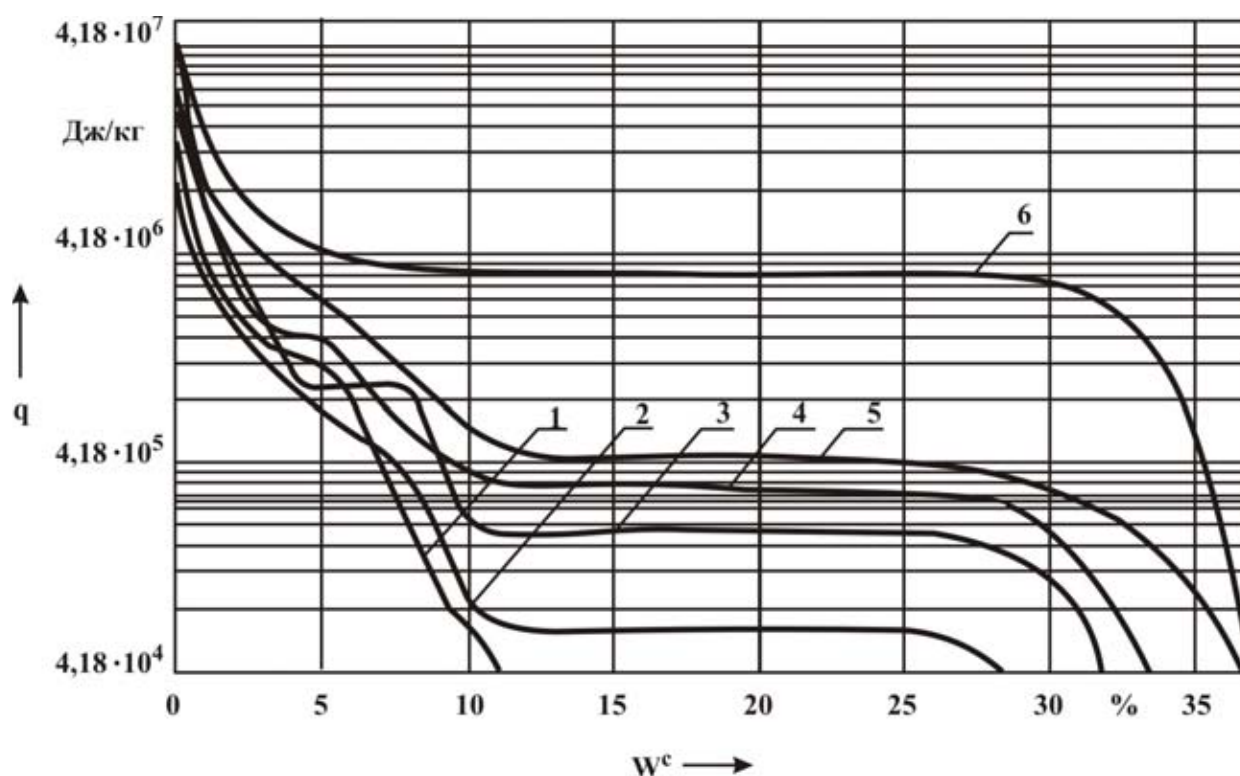


Рис. 8 – Энергограммы угля и породы различных классов крупности; уголь: 1 – 0,25-0,16 мм; 2 – 0,16-0,08 мм; 3 – 0,08-0,04 мм; 4 – < 0,04 мм; 5 - < 0,01 мм; порода: < 0,04 мм

С помощью этого метода был исследован ряд угольных смесей различных классов крупности.

Для определения количества влаги различных видов удобнее пользоваться

совместно графиками сушки, термограммой и энергограммой. В этом случае переход одного вида влаги в другой фиксируется сингулярными точками как на энергограмме, так и на термограмме.

Количества влаги различных видов, а также границы влагосодержания, в которых она находится, полученные в результате анализа рисунков, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Количество влаги различных видов в диспергированных углях (в абсолютных процентах)

Клас- сы круп- нос- ти, мм	$W_{\text{мол.}}, \%$	Виды влаги					
		Капиллярная, %		Адгези- онная, %	Микро- капил- лярная, %	Полимо- лекуляр- ная, %	Моно- молеку- лярная, %
		Промежу- точная	Стыковая				
<0,5	21,8	5	11	6	4	3	1
0,25- 0,16	5,8	4	4	4	1	2,5	0,5
0,16- 0,08	7,6	5	12	5	3	3	1
0,08- 0,04	11,1	5	15	6	2	3	1
<0,04	24,5	5	17	7	2	3	1
<0,01	28,0	5	18	9	-	5	1

Недостаточно точно определяется этим методом количество влаги мономолекулярной адсорбции, установлено лишь, что оно не превышает 1 %.

Из приведенных в таблице данных следует, что при уменьшении крупности угля возрастает общее содержание в них связанной воды (от 11 % для класса 0,25-0,16 мм до 38 % для класса < 0,01 мм), соответственно возрастает количество стыковой адгезионной влаги, а также влаги полимолекулярной адсорбции.

Общей закономерностью является не только увеличение количества, но и повышение энергии связи стыковой воды с уменьшением крупности исследуемого материала. Первое явление можно объяснить увеличением числа частиц в единице объема (т.е. числа стыков), второе – уменьшением радиуса кривизны манжет. Неизменное количество внутрипромежуточной капиллярной влаги объясняется независимостью пористости осадка от крупности слагающих его частиц.

Материалы, крупность которых такова, что внутренние микропоры угольных веществ не разрушены, но достаточно раскрыты для проникновения в них воды, имеют энергограммы с четко выраженным участком влаги микропор. Однако величина этого участка зависит, по-видимому, как от крупности, так и от свойств угля, обусловленных их генезисом. Так, например, газовые угли, обладающие большой внутренней поверхностью, имеют значительное количество влаги микропор, фиксируемое энергограммой угля класса менее 0,5 мм.

При значительном измельчении угольных частиц и разрушении при этом

внутренних пор угольного вещества влага микропор практически отсутствует. В процессе сушки в этом случае вслед за адгезионной влагой удаляется влага полимолекулярной, а затем мономолекулярной адсорбции.

Таким образом, полученные энергограммы связи воды с внешней и внутренней поверхностью угольных частиц, а также с поверхностью пор дисперсных углей подтверждают основные закономерности, полученные ранее другими исследователями при изучении свойств угольного вещества и пористых систем.

Из энергограмм, полученных предложенным методом, следует, что энергия связи различных видов влаги для материалов разной крупности не одинаковы и только энергия поли- и монослоя всех материалов отличается незначительно

Обращает на себя внимание энергия связи капиллярно-связанной влаги породы крупностью менее 0,04 мм. Её величина почти на порядок выше соответствующих видов влаги угля.

Максимальная энергия связи монослоя достигает величины $2,1 \cdot 10^{-7}$ - $2,41 \cdot 10^{-7}$ Дж/кг и соответствует влагосодержанию материала 1-0,2 %.

Таким образом, присутствие в слое диспергированного угля воды связанной с его поверхностью весьма значительными величинами энергии связи может являться причиной явления кольматации и создания в прискважинной зоне водо- и газонепроницаемого слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П.А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки // Труды Всесоюзного научно-технического совещания по интенсификации сушки. – М: Профиздат. – 1958. – С. 149-153.
2. Лыков А.В. Теория сушки. – М: Энергия, 1968. – 190 с.
3. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.-Л: Госэнергоиздат, 1956. – 256 с.
4. Казанский П.Ф., Казанский В.М. Термограммы сушки дисперсных тел, увлажненных различными жидкостями. // Инженерно-физический журнал. – 1973. - № 6. – С. 34-42.
5. Э.И. Мучник, Е.Я. Беккер, Г.С. Пигоров. Исследование видов влаги в угольных шламах по величине энергии связи. // Обогащение полезных ископаемых.- 1976. - № 18. – С. 32-38.
6. К.К. Софийский, Э.И. Мучник, Д.П. Силин. Исследования энергии связи рабочей жидкости с углем при гидродинамическом воздействии на пласт. // Сб. научн. тр. «Геотехническая механика». – Днепропетровск: 2000. - № 21. – С. 97-101.