

Раздел 3. Прогноз и управление состоянием горного массива

УДК 622.831.322

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЖИДКОСТЬЮ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЕГО ВЫБРОСОПАСНОСТИ В ЗОНАХ ПГД**

к.т.н. Житленок Д.М. (ГПО "Дзержинсуголь")

*У статті приведені результати досліджень з впливу вологи на руйнування вугільного пласта у гідроімпульсному режимі. В результаті виконаних робіт встановлені техніко – технологічні параметри способу зволоження пластів крутого падіння.*

**DYNAMIC INFLUENCE  
BY LIQUID ON COAL LAYER WITH PURPOSE OF DECLINE  
HIM VYBROSOOPASNOSTY IN THE PGD AREAS**

Zhitlyonok D.M.

*The results of researches on the preliminary moistening of coal layer in the hydroimpul'snom mode are resulted in the article. As a result of the executed works set technical are technological parameters of method of moistening for the layers of the steep falling.*

При отработке крутых угольных пластов происходят процессы наложения зон опорного давления от разрабатываемого пласта на смежный. Поэтому в практике ведения горных работ возникает необходимость предварительной разгрузки угольных пластов от повышенного горного давления. Одним из таких методов, созданных в ИГТМ НАНУ является метод гидродинамического разрушения угля. Разрушение угля при гидродинамическом воздействии на пласт происходит в результате послойного отрыва от массива заполненных рабочей жидкостью слоев угля, в капилляропористой структуре которого возникают силы, направленные в сторону скважины достаточные при определенных условиях для преодоления предела прочности угля на разрыв.

Возможность разрушения зависит от различных факторов, в том числе и от диаметра капилляров, пор и трещин, составляющих пористую структуру угля.

В.В. Ходот [1] предложил следующую классификацию пор в природных углях:

1) ультра- или микропоры диаметром менее  $10^{-9}$  м, образующие сорбционный объем;

2) переходные поры диаметром от  $10^{-9}$  до  $10^{-8}$  м, составляющие область капиллярной конденсации;

3) субмакропоры диаметром от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  м, образующие область медленной ламинарной фильтрации;

4) макропоры диаметром  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$  м, образующие область интенсивной ламинарной фильтрации;

5) видимые поры и трещины размером более  $10^{-5}$  м.

По данным Ю.С. Премыслера [2] сорбционный объем вместе с объемом переходных пор, т.е. суммарный объем пор менее  $10^{-8}$  м, составляют около 80% общего объема пор.

Для случая гидродинамического разрушения интерес представляют те поры в которых путем капиллярного заполнения или капиллярной конденсации происходит заполнение рабочей жидкостью в период ее подачи в угольный пласт и не происходит обратная фильтрация при сбросе давления в скважине в силу достаточно высоких значений ее энергии связи жидкости с угольным скелетом.

Для разрушения угля в прискважинной части пласта при гидродинамическом воздействии необходимо, чтобы работа сил вязкого трения  $A_v$  превышала работу, необходимую для образования новых поверхностей при отрыве слоя угля  $A_s$ . Кроме того, часть работы по разрушению расходуется на отрыв жидкости от скелета пористого тела при обратной фильтрации во время сброса давления. Для определения этой работы рассмотрим виды связи жидкости в пористых системах и оценим их влияние на процесс гидродинамического воздействия. Согласно П.А. Ребиндеру [3] выделяют четыре основных вида влаги:

- 1) химически связанная влага;
- 2) физико-химически связанная влага;
- 3) физико-механически связанная влага;
- 4) свободная влага.

Очевидно, что химически связанная влага, наиболее прочно связанная с твердым телом и входящая в состав его кристаллической решетки, не претерпевает изменений в процессе гидродинамического воздействия и не может оказывать влияние на разрушение.

Физико - химически связанная влага представляет собой моно- и полимолекулярный слой на поверхностях пористого тела и остается неподвижной при фильтрации жидкости через пористую систему, т.к. пленки влаги достаточно прочно связаны с поверхностью скелета. Хотя до сих пор нет единого мнения относительно толщины граничных гидратных адсорбционных слоев, переходящих с удалением от поверхности в объемную фазу воды, можно предположить, что эта влага также не изменяется при гидродинамическом воздействии и не влияет на движение фильтрующейся жидкости.

Свободная влага удаляется из пористой среды под действием силы тяжести, и при гидродинамическом воздействии, по сути, является рабочим агентом. Энергия, необходимая для движения этой жидкости затрачивается на преодоление сил вязкого трения.

Однако в угольном пласте находится еще и физико - механически связанная влага, удерживаемая, в основном, за счет капиллярных сил. Присутствие газа в пористой среде обуславливает существование в ней

свободных поверхностей воды, вследствие чего на границе соприкосновения трех фаз (твердой, жидкой и газообразной) возникают капиллярные силы. Рассмотрим влияние этих сил на разрушение угольного пласта, т. к. капиллярные силы повышают влагоудерживающую способность пористой среды и задерживают движение жидкости [4].

Капиллярная связь жидкости характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$  и капиллярным давлением  $P_\sigma$ . Коэффициент поверхностного натяжения в свою очередь характеризует свободную потенциальную энергию молекул жидкости, находящихся в поверхностном слое. Мерой смачивания  $B$  является косинус краевого угла смачивания  $\cos\theta$ :

$$B = \cos \theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{тж}}{\sigma_{жг}}; \quad (1)$$

где  $\sigma_{тг}$  и  $\sigma_{тж}$  -- коэффициенты поверхностного натяжения твердое - газообразное, твердое - жидкое и жидкое - газообразное соответственно.

Величина угла смачивания зависит от свойств поверхности твердого тела (при гидрофильной поверхности  $\theta < 90^\circ$ , при гидрофобной -  $\theta > 90^\circ$ ).

Молекулярное давление поверхностного слоя жидкости  $P_r$  обусловлено силами молекулярного сцепления и зависит от кривизны поверхности [5]:

$$P_r = P_0 + 2\sigma_{жг} \left( \frac{1}{r} \right); \quad (2)$$

где  $P_0$  -- молекулярное давление для плоской поверхности;

$\left( \frac{1}{r} \right)$  -- средняя кривизна поверхности.

Очевидно, что для выпуклых поверхностей  $P_r > P_0$  (т.к.  $\left( \frac{1}{r} \right) > 0$ ) для вогнутых  $P_r < P_0$  для плоских  $P_r = P_0$ . Так как

$$P_\sigma = P_r - P_0 = 2\sigma_{жг} \left( \frac{1}{r} \right); \quad (3)$$

капиллярное давление будет положительным для выпуклых поверхностей, отрицательным -- для вогнутых и равно нулю для плоских [6].

Предполагая поверхность жидкости сферической имеем

$$P_\sigma = \frac{2\sigma_{жг}}{r'}; \quad (4)$$

где  $r'$  -- радиус мениска жидкости [4].

Капиллярное давление является причиной поднятия смачивающей или опускания несмачивающей жидкости в капилляре на высоту  $h_k$ , которая определяется формуле Жюрена [7]:

$$h_k = \frac{2\sigma_{жс}}{r'g(\rho_0 - \rho_2)}; \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  
 $\rho_0$  – плотность жидкости;  
 $\rho_2$  – плотность газа.

Приняв мениск жидкости за сферическую поверхность, будем иметь

$$r' = \frac{r_k}{\cos \theta}; \quad (6)$$

где  $r_k$  – радиус капилляра,  
 и ввиду малости  $\rho_2$  имеем

$$h_k = \frac{2\sigma_{жс} \cos \theta}{r_k g \rho_0} \quad (7)$$

Из этого видно, что высота поднятия жидкости обратно пропорциональна радиусу капилляра.

В четочных капиллярах, т. е. в таких, радиус которых периодически увеличивается и уменьшается, может иметь место не одно, а несколько равновесных состояний столбика жидкости со свободной поверхностью. При заполнении порового пространства угля вокруг скважины наблюдается явление капиллярного гистерезиса, суть которого заключается в том, что высота капиллярного поднятия в полидисперсном пористом теле, каковым и является угольный пласт, неодинакова при заполнении последнего водой в различных направлениях. При заполнении порового пространства снизу высота капиллярного поднятия соответствует высоте в самом широком капилляре, а при заполнении сверху - в самом узком.

В зависимости от различий в механизме образования влаги и учитывая энергию связи влаги с поверхностью, различают некапиллярные микропоры ( $r_k < 10^{-9}$  м), микрокапиллярные ( $r_k = 10^{-9} - 10^{-7}$  м), мезокапиллярные ( $r_k = 10^{-7} - 10^{-5}$  м), макрокапиллярные ( $r_k = 10^{-5} - 10^{-3}$  м) поры и некапиллярные макропоры ( $r_k > 10^{-3}$  м). При радиусе капилляра менее  $10^{-9}$  м он заполняется влагой только путем моно- и полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации паров. При большем радиусе происходит непосредственное заполнение капилляров и пор посредством соприкосновения.

Энергию капиллярной связи можно рассчитать по формуле:

$$A_{\text{мс}} = \frac{2\sigma_{\text{жсг}} V_{\text{ю}}}{r_{\text{к}}} \quad (8)$$

где  $V_{\text{ю}}$  – удельный объем  $V_{\text{ю}} = \frac{1}{\rho_{\text{ж}}}$ ;

Расчетные величины энергии капиллярной связи приведены в табл.1.

Таблица 1. Величины энергии связи в зависимости от радиуса капилляра.

Радиус капилляра, м	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Энергия связи, Дж/кг	$2,92 \cdot 10$	$2,92 \cdot 10^2$	$2,92 \cdot 10^3$	$2,92 \cdot 10^4$

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что гидравлическое сопротивление движению жидкости в наибольшей мере оказывает физико-механически связанная влага, находящаяся в порах и трещинах диаметром  $5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-6}$  м.

Основой для разработки метода определения энергии связи различных видов влаги с угольным веществом 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) [8].

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.

При сушке малых образцов (рис.1) 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).

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

На рис. 2. представлены кривая сушки 1, температурная кривая 2 и энергограмма 3 образца угля.

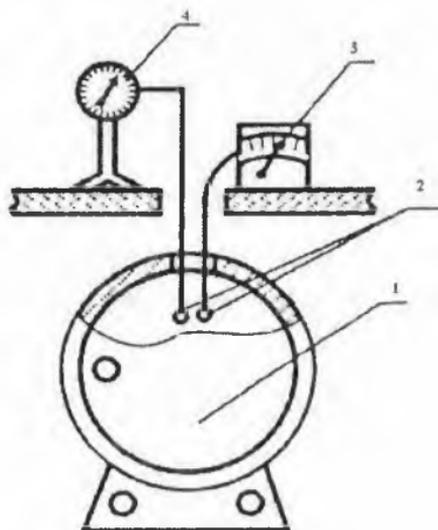


Рис. 1. Установка для определения энергии связи воды с поверхностью угля: 1 – термостат; 2 – чашечка с навесками угля; 3 – термистер; 4 – торсионные весы.

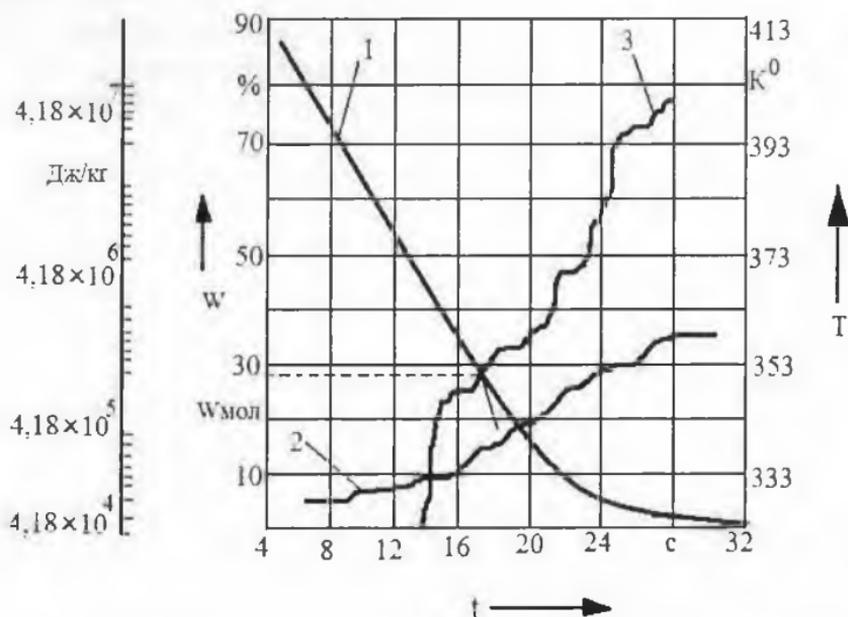


Рис. 2. Исходные данные для расчета энергии связи воды с поверхностью угля: 1 – кривая сушки; 2 – термограмма; 3 – энергограмма.

Расчет энергии связи осуществлялся следующим образом.

Дифференциальное тепло  $\Delta H$ , подводимое к обводненному образцу в процессе изотермической сушки за время  $\Delta t$ , расходуется на нагревание

Ребиндер П.А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки. // М.: Профиздат. – 1958. – С. 149-153.  $= cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau}$  (9)

Макрокинетика процессов в пористых средах (Топливные элементы) / В.С. Маркин, М.Р. Тарасевич, Ю.Г. Чирков. – М.: Наука 1971. 364 с.  
Лыков А.В. Теория сушки. Энергия. 1968. – 472 с. (10)

Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / под ред. Е.Д. Фролова. – М.: МГУ. 1988. – 279 с.  
Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные и дисперсионные системы). – М.: Химия. 1982. – 400 с.  $\frac{\Delta m}{\Delta \tau}$  (11)

Мучник Э.И., Беккер Е.Я., Пилюров Г.А. Исследование видов влаги в угольных шламах по величине энергии связи. // Обогащение и брикетирование угля. – 1974. – № 11. – С. 247-250.  $\frac{\Delta H}{\Delta \tau}$

Софийский К.К., Мучник Э.И., Силин Д.П. Исследование энергии связи бочей жидкости с углем при гидродинамическом воздействии на пласт. Сб. науч. тр. Геотехническая механика. – № 21. – Днепропетровск: ИГТМ АН Украины. 2000. – С. 97-101.

- $\Delta H$  – масса образца, кг;
- $\Delta T$  – приrost температуры, град.
- $\Delta m$  – количество испаренной воды, кг;
- $g$  – энергия связи воды с углем, Дж/кг.

В период постоянной скорости сушки, когда из угля испаряется свободная влага  $\left(\frac{\Delta H}{\Delta \tau}\right)_{напр}$  - отсутствует. Так как условия опыта предполагают равенство тепловых потоков в каждый дифференциальный отрезок времени на протяжении всей сушки, то на основании уравнения теплового баланса можно записать:

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta \tau}\right)_1 = \left(\frac{\Delta H}{\Delta \tau}\right)_2; \quad (12)$$

где  $\left(\frac{\Delta H}{\Delta \tau}\right)_1$  - расход тепла в период постоянной скорости сушки;  
 $\left(\frac{\Delta H}{\Delta \tau}\right)_2$  - то же в период падающей скорости сушки.

Поставив значения составляющих расхода тепла получим:

$$\left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_1 = \left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_2 + \left(g \frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_2 \quad (13)$$

откуда

$$g = \frac{1}{\left(\frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_2} \left[ \left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1 + \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_1 - \left(cm \frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2 - \left(h \frac{\Delta m}{\Delta \tau}\right)_2 \right] \quad (14)$$

Рассчитав энергию связи, построим графики, анализ которых показывает изменение величины этой энергии от влажности образца [9]. Учитывая большой диапазон значений энергии, используем для построения кривой полулогарифмический анаморфоз. Построив искомую зависимость для каждого из опытов и, определив среднее значение получим энергограмму сушки, имеющую характерные участки. Как видно из рис. 3 по мере удаления влаги из капилляров (участок кривой правее точки *A*) энергия связи быстро возрастает. Достигнув точки *A* ( $W^c \approx 50$ ) кривая переходит в относительно горизонтальный участок *AB*, соответствующий удалению из угля более или менее однородной по характеру взаимодействия стыковой влаги на одном энергетическом уровне. Более прочно связанная адгезионная влага удаляется при дальнейшем нагревании образца (участок *BC*). Резкий подъем этого участка энергограммы обусловлен уменьшением толщины адгезионной пленки и соответствующим повышением прочности связи с внешней поверхностью. Участок *CD* указывает на удаление влаги из микрокапилляров ( $\tau < 10^{-7}$  м), которое происходит при повышенной, нежели из микрокапилляров, энергии [5]. Дальнейшее увеличение энергии происходит при удалении физико – химически связанной влаги полимолекулярной адсорбции (участок *DE*) и мономолекулярной адсорбции (участок левее точки *E*).

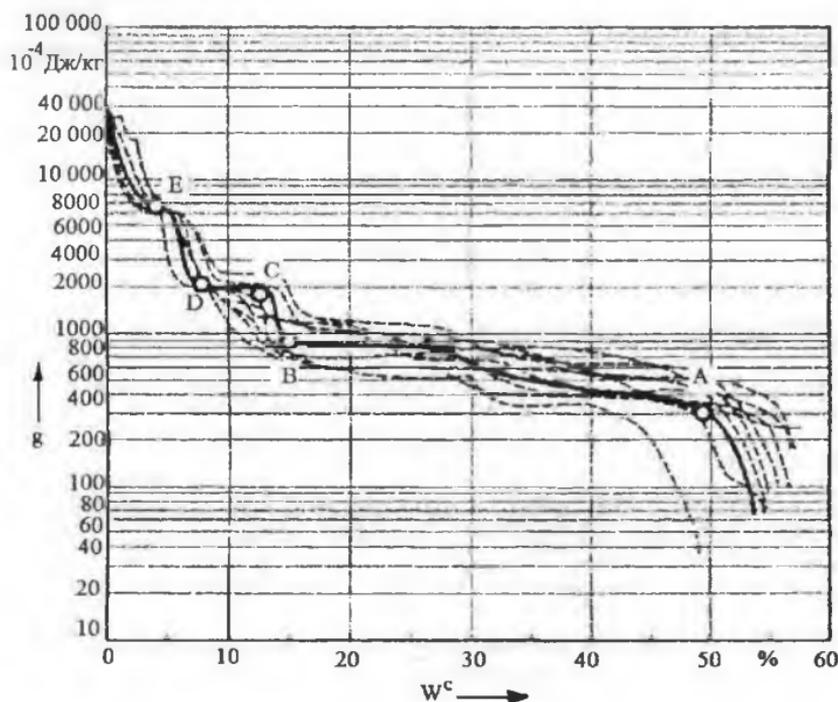


Рис. 3. Зависимость энергии связи жидкости  $g$  с углем от влагосодержания  $W^c$  ----- - кривые для каждого из опытов; ——— - усредненная энергограмма.

Таким образом, получена зависимость, позволяющая оценить энергию связи жидкости с пористым телом для различных видов влаги.

На рис. 4 представлена зависимость величины энергии связи от диаметра капилляров. Поверхности капилляра со средним диаметром  $5 \cdot 10^{-5}$  м обладают энергией связи с заполняющей его жидкостью  $5 \cdot 10^5$  Дж/кг. Вместе с тем, энергия выделяемая при адиабатическом расширении метана в процессе гидродинамического воздействия составляет также около  $5 \cdot 10^5$  Дж/кг.

Таким образом при гидродинамическом воздействии на угольный пласт эффективный фильтрующий объем последнего ограничивается макрокапиллярами диаметром  $d_k \approx 5,2 \cdot 10^{-6}$  м. Капилляры с меньшим диаметром заполняются рабочим агентом при подаче жидкости в скважину и при циклическом воздействии препятствуют движению по ним как жидкости, так и газа, создавая достаточно высокое гидравлическое сопротивление. Сброс давления, вызывающий изменение направления движения жидкости и газа в системе создает усилие, отрывающее заполненный связанной влагой слой от массива угля.

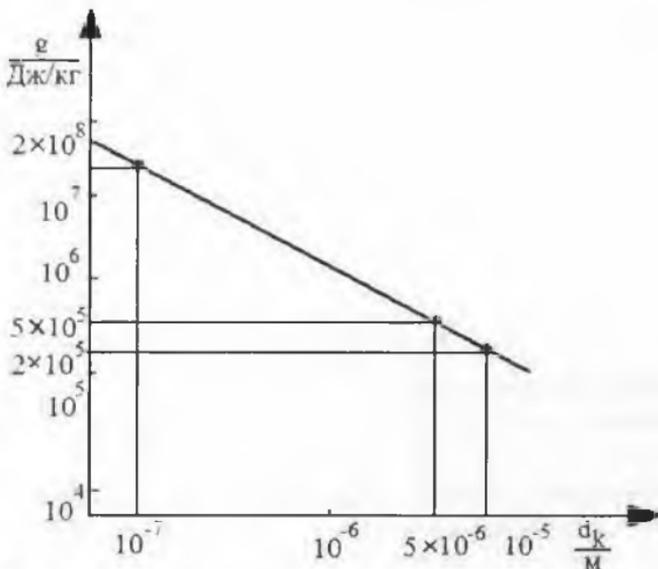


Рис. 4. Изменение энергии связи  $g$  от диаметра капилляра  $d_k$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. – М.: Гсгортехиздат. 1961. – 323 с.
2. Премыслер Ю.С. Дифференциальная пористость и трещиноватость углей выбросоопасных пластов Донбасса: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.11 / Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – М., 1963. – 17 с.

3. Ребиндер П.А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки. // - М.: Профиздат. – 1958. – С. 149-153.
4. Макрокинетика процессов в пористых средах (Топливные элементы) / Ю.А. Чизмадзе, В.С. Маркин, М.Р. Тарасевич, Ю.Г. Чирков. – М: Наука, 1971. 364 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки. – М: Энергия. – 1968. – 472 с.
6. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / под ред. Е.Д. Щукина. – М: МГУ, 1988. – 279 с.
7. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные и дисперсионные системы). – М.: Химия. 1982. – 400 с.
8. Мучник Э.И., Беккер Е.Я., Пигоров Г.С. Исследование видов влаги в угольных шламах по величине энергии связи. // Обогащение и брикетирование угля. – 1974. - № 11. – С. 24 – 29.
9. Софийский К.К., Мучник Э.И., Силин Д.П. Исследование энергии связи рабочей жидкости с углем при гидродинамическом воздействии на пласт. // Сб. науч. тр. Геотехническая механика. - № 21. – Днепрпетровск: ИТ ТМ НАН Украины. 2000. – С. 97 – 101.