

УДК 622.236:539.375

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВОДОНАСЫЩЕНИИ В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ревва В. Н.

(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Оцінено вплив водонасичення гірських порід на їхні фізико-механічні властивості в умовах об'ємного навантаження.

The influence of water saturation of rocks on their physical and mechanical properties is evaluated in conditions of volume loading.

Процессы реструктуризации угольной промышленности Украины предусматривают закрытие старых, нерентабельных шахт. Проектами закрытия шахт в большинстве случаев предусмотрена их мокрая консервация, т.е. водоотлив из выработок прекращается. Вследствие этого уровень шахтных вод будет подниматься, и выработки будут затоплены. В результате водонасыщения нарушенного углепородного массива будут изменяться физико-механические свойства горных пород, что в итоге может привести к активизации сдвижения земной поверхности над выработанным пространством. Этот процесс практически не изучен, однако косвенные факторы (участившееся повреждение зданий на полях закрытых шахт, заводнение местности вследствие оседания поверхности и поднятия грунтовых вод) подтверждают о его возможности. Поэтому возникает настоятельная необходимость в исследовании влияния водонасыщения на изменение физико-механических свойств горных пород.

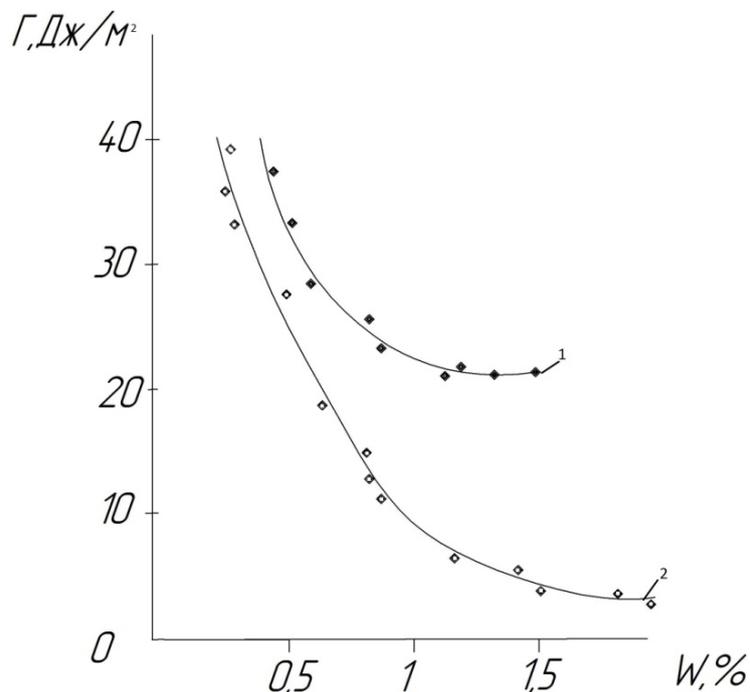
В настоящее время не существует единого мнения относительно главного проводника воды в подземные выработки [1]. Гидрологи полагают, что это песчаники и угольные пласты. Дру-

гие считают, что это трещины, образовавшиеся в подработанном массиве, зоны деформаций растяжения динамической и статической мульд сдвижения.

В настоящей работе ограничимся исследованием влияния водонасыщения на изменение физико-механических свойств песчаников и углей.

Важной характеристикой трещиностойкости горных пород (сопротивляемости распространению в них трещин) является эффективная поверхностная энергия (ЭПЭ) – энергия, необходимая для образования нового элемента поверхности, интегрально учитывающая все механизмы разрушения.

Экспериментальные исследования влияния водонасыщения на ЭПЭ песчаников [2] позволили установить следующее. Физически связанная влага существенно влияет на трещиностойкость песчаников. Так величина ЭПЭ песчаников с силикатным цементом (как правило, высокопористых) уменьшается до 8 раз (рис. 1).



- 1 – глинисто – карбонатный цемент;
- 2 – глинисто слюдистый цемент

Рис. 1. Зависимость ЭПЭ песчаников от влажности

При этом наиболее значительное уменьшение ЭПЭ наблюдается при влажности 1,2-1,5 %. При дальнейшем увеличении влажности ЭПЭ изменяется незначительно. В песчаниках с карбонатным цементом (особенно с базальным) ЭПЭ уменьшается незначительно (в 1,5 раза) при изменении влажности от 0,5 % до 0,75 %.

Учитывая, что естественная влажность песчаников может изменяться от 0,36 % до 7,39 % [3], можно предположить, что уже в естественных условиях вся внутренняя поверхность песчаников покрыта физически связанной водой. Искусственное водонасыщение приводит лишь к появлению слабо связанной и свободной воды. Образование водяной плёнки в порах и трещинах, на межзеренных границах уже не влияет на уменьшение сил взаимодействия, но значительно облегчает скольжение. Поэтому увлажнение приводит к пластифицированию песчаников.

Вода, находящаяся в поровом пространстве, наряду с физико-химическим эффектом проявляет и механический эффект давления, который наиболее сильно влияет на деформацию горных пород. При внешней сжатии процесс уменьшения объёма пор приводит к увеличению давления воды, которое действует перпендикулярно поверхности пор. Поровое давление воды уменьшает приложенное внешнее нормальное напряжение, но не оказывает влияния на касательные напряжения, что в конечном итоге приводит к возрастанию упругих свойств породы.

Горные породы в массиве, особенно в окрестности горных выработок, находятся под действием объемного неравнокомпонентного поля сжимающих напряжений. Изменение физико-механических свойств горных пород при объемном нагружении предопределяет устойчивость горного массива, потеря которой приводит к динамическому разрушению.

Экспериментальные исследования водонасыщенных песчаников в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений позволили установить следующее [2].

В песчаниках, в цементе которых содержатся глинисто-слюдистые минералы (глинисто карбонатный, и глинисто-слюдистый цемент), отмечается с ростом влажности уменьшение модулей деформации и сдвига, увеличение коэффициента попе-

речной деформации. Возрастает деформируемость пород, уменьшается их объемная прочность. Для песчаников с карбонатным цементом эти изменения практически неощутимы. Водонасыщенный образец способен накопить энергии лишь немного меньше «сухого», однако непосредственно на разрушение (образование новых поверхностей) затрачивается лишь незначительная её часть, а остальная часть представляет собой энергию устойчивых дефектов. Величина вновь образованной поверхности при водонасыщении в 3-4 раза меньше, чем у «сухих» образцов, но примерно во столько же раз уменьшается дилатируемый объем, поэтому удельная поверхность разрушенного материала сохраняется на одном уровне. Удельная поверхностная энергия уменьшается в два раза.

Характерным является разрушение водонасыщенных образцов песчаника. По внешним признакам начало разрушения установить практически невозможно. Оно локализуется в плоскости действия максимальных касательных напряжений. Происходит медленный и устойчивый рост трещин без спада напряжений и каких-либо шумовых эффектов, т.е. реализуется более вязкое разрушение.

Учитывая особое положение углей среди горных пород, а также то, что угольный пласт может быть главным проводником воды в подземные выработки, на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия УНТС [2] были проведены экспериментальные исследования деформирования и разрушения «сухих» и водонасыщенных угольных образцов для разных видов напряженного μ_σ [4] и деформационного μ_ε [5] состояний, характеризующихся параметрами Лоде-Надаи:

$$\mu_\sigma = 2 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) - 1, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;

$$\mu_\varepsilon = 2 \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) - 1, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

При $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ $\mu_\sigma = -1$ – вид напряженного состояния, соответствующий обобщенному сжатию; $\mu_\sigma = 0$ – обобщенному

сдвигу, $\mu_\sigma = 1$ – обобщённому растяжению. Аналогично для видов деформационного состояния.

На основании экспериментальных данных и теоретических исследований о процессах нагружения и деформирования угольного пласта в призабойной зоне выделяются три характерных участка различного объемного нагружения и различного механического состояния [6, 7].

Первый участок объемного нагружения угольного пласта в глубине массива вне зоны влияния выработки (зона «нетронутого» массива) с учётом гипотезы о геостатическом напряженном состоянии характеризуется тем, что три главных напряжения связаны соотношениями $\sigma_1 = \gamma H$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \gamma H$, где γ – объемный вес вышележащих пород, H – глубина залегания пласта; λ – коэффициент бокового распора. В этом случае $\mu_\sigma = -1$, т.е. вид напряженного состояния соответствует обобщенному сжатию. Разделение тензора главных напряжений позволяет выделить из общего напряженного состояния сумму двух напряженных состояний – равномерного объемного сжатия и одноосного сжатия.

Второй участок объемного нагружения угольного пласта в глубине массива, где наблюдается частичное разрушение и сжимающие напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 достигают своих наибольших значений, а промежуточное главное напряжение σ_2 достигает полусуммы σ_1 и σ_3 . Величина μ_σ приближается к нулю, т.е. на втором участке нагружения угольного пласта вид напряженного μ_σ близок к обобщенному сдвигу. Напряженное состояние угольного пласта в зоне максимальных сжимающих напряжений можно представить в виде суммы напряженных состояний – объемного равномерного сжатия и чистого сдвига.

Третьим участком объемного нагружения угольного пласта является кромка забоя, где минимальное сжимающее напряжение σ_3 стремится к нулю, а максимальное сжимающее напряжение σ_1 снижается до промежуточного главного напряжения σ_2 , что свидетельствует о реализации обобщенного растяжения. Разделение тензора напряженного состояния позволяет выделить объемное сжатие и одноосное растяжение.

Таким образом, при исследовании влияния водонасыщения угля при различных видах напряженного состояния возможно

оценить его на каждом участке объемного нагружения угольного пласта в глубине массива.

Ранее [8, 9], было установлено, что вид напряженного состояния существенно влияет на механические свойства углей при деформировании и разрушении их в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия, поэтому его необходимо учитывать при экспериментальном определении механических характеристик углей.

В настоящей работе моделировалось пять видов напряженного состояния – обобщенное сжатие ($\mu_\sigma = -1$), между обобщенным сжатием и сдвигом ($\mu_\sigma = -0,5$), обобщенный сдвиг ($\mu_\sigma = 0$), между обобщенным сдвигом и растяжением ($\mu_\sigma = 0,5$) и обобщенное растяжение ($\mu_\sigma = 1$). На рисунке 2 представлена зависимость модуля деформации E угля марки К пласта d_4 ш/у «Покровское» (на следующих рисунках зависимости для этого же угля) с исходной (естественной) влажностью 1,6 % и водонасыщенного до 3,6 % в зависимости от вида напряженного состояния μ_σ .

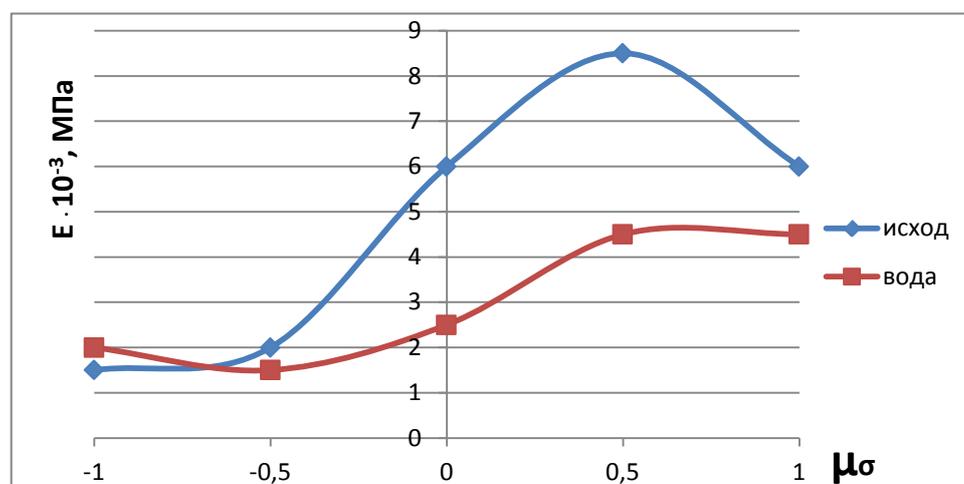


Рис. 2. Зависимость модуля деформации E угля от вида напряжённого состояния μ_σ

При $-1 \leq \mu_\sigma \leq -0,5$ (в зоне нетронутого массива) влияние водонасыщения незначительно, а при $-0,5 \leq \mu_\sigma \leq 1$ (зона предельного состояния), происходит уменьшение величины модуля деформации, и проявляется изменение в сторону увеличения пластических свойств угля.

Тенденция к пластифицированию угля при водонасыщении отмечается так же на зависимостях модуля сдвига G (рис. 3) и коэффициента поперечной деформации ν (рис. 4) от вида напряженного состояния μ_σ , при этом наиболее существенное изменение их значений происходит при $\mu_\sigma = 0,5$ (в зоне предельного состояния).

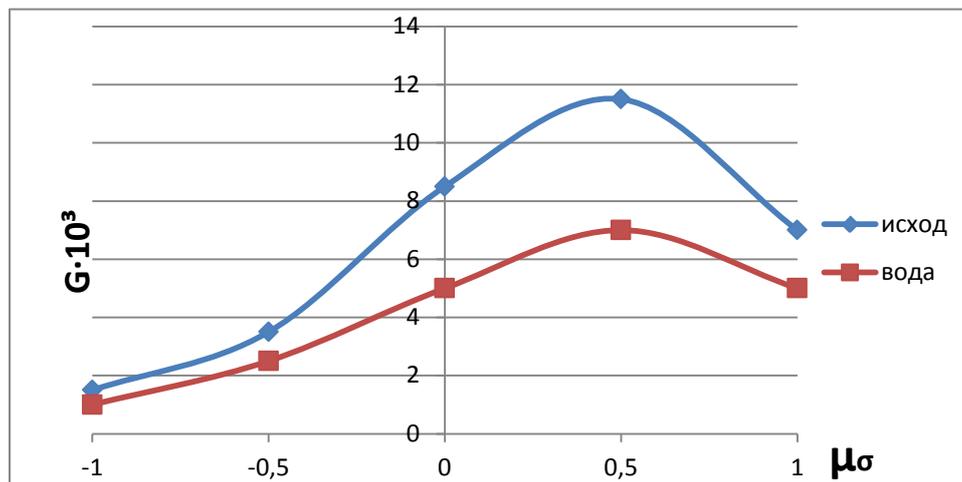


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига G угля от вида напряженного состояния μ_σ

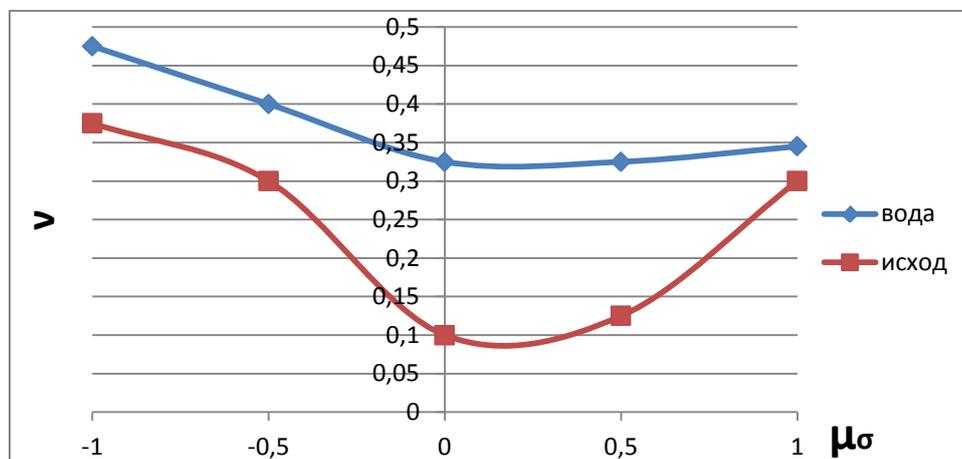


Рис. 4. Зависимость коэффициента поперечной деформации ν угля от вида напряжённого состояния μ_σ

Для водонасыщенного угля несоответствие ($\mu_\epsilon \neq \mu_\sigma$) между видами напряженного и деформационного состояниями стремится

ся к соответствию ($\mu_\varepsilon \approx \mu_\sigma$) (рис. 5) кроме $\mu_\sigma = 1$ (на кромке за-
боя).

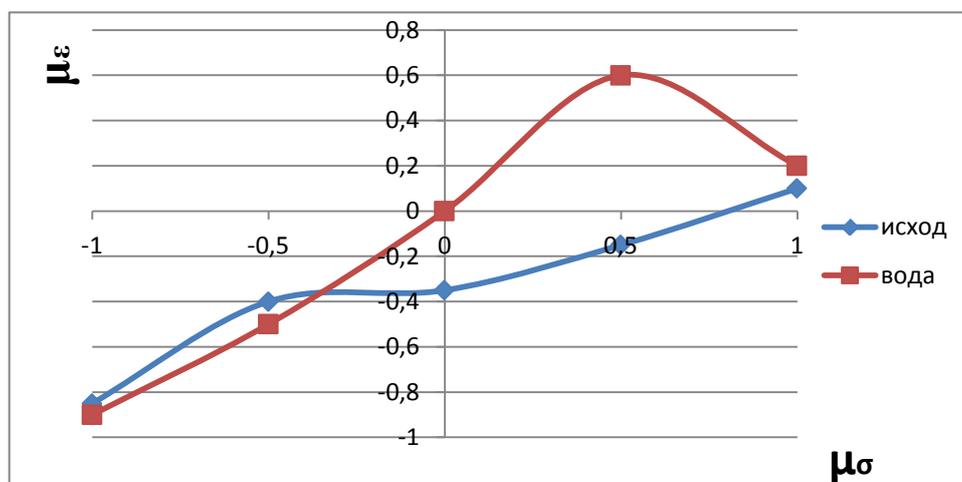


Рис. 5. Зависимость вида деформационного состояния μ_ε для
вида напряженного состояния μ_σ

Зависимости энергии изменения формы A_f (рис. 6) и измене-
ния объема A_v (рис. 7) в момент разрушения угля от вида напря-
женного состояния μ_σ позволяют сделать выводы, что на разру-
шение водонасыщенного угля необходимо затратить меньше
энергии, чем исходного.

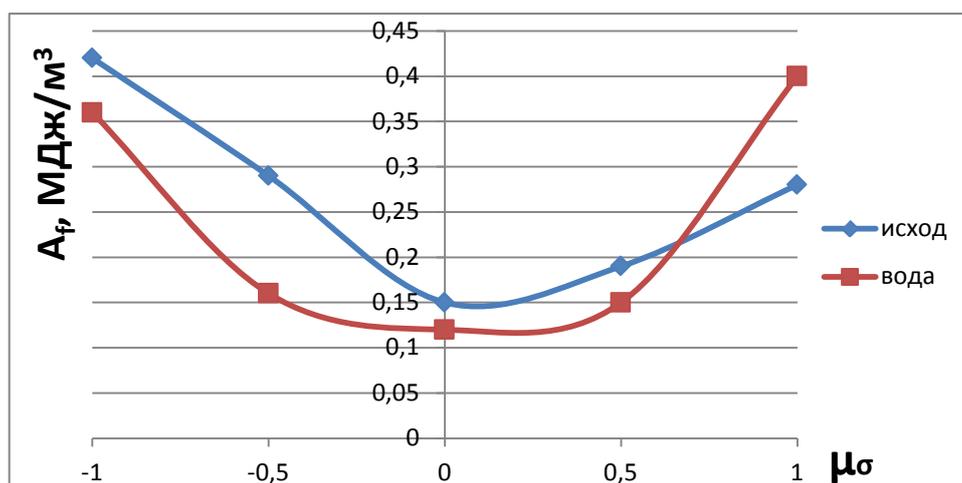


Рис. 6. Зависимость энергии изменения формы A_f угля от
вида напряженного состояния μ_σ

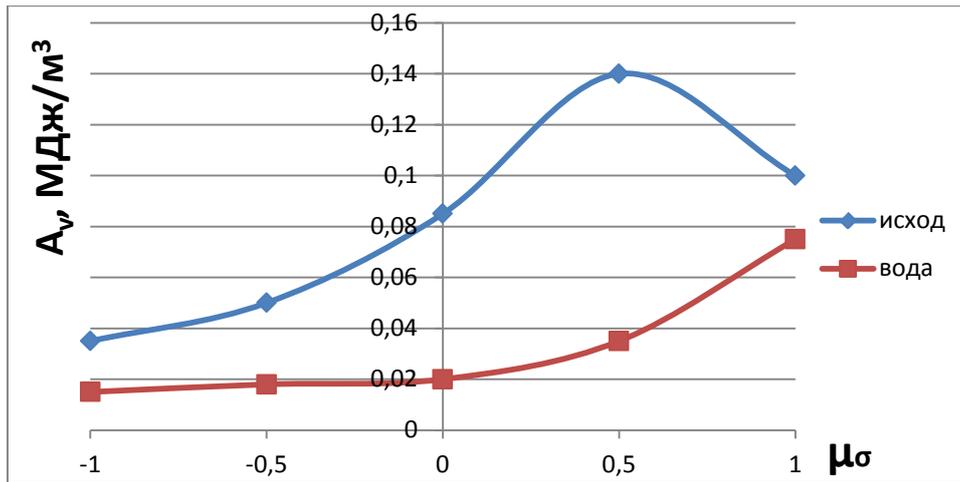


Рис. 7. Зависимость энергии изменения объема A_v угля от вида напряженного состояния μ_σ

При этом энергия формоизменения A_f у водонасыщенного угля в 5-10 раз больше энергии изменения объема A_v , т.е. преобладающее количество энергии деформирования угля затрачивается на пластическую деформацию и реализуется более вязкое разрушение.

Из зависимости полной энергии деформирования A угля от вида напряженного состояния μ_σ (рис. 8) следует, что энергия деформирования водонасыщенного угля меньше, чем у исходного, а минимум её наблюдается при виде напряженного состояния, который соответствует обобщенному сдвигу.

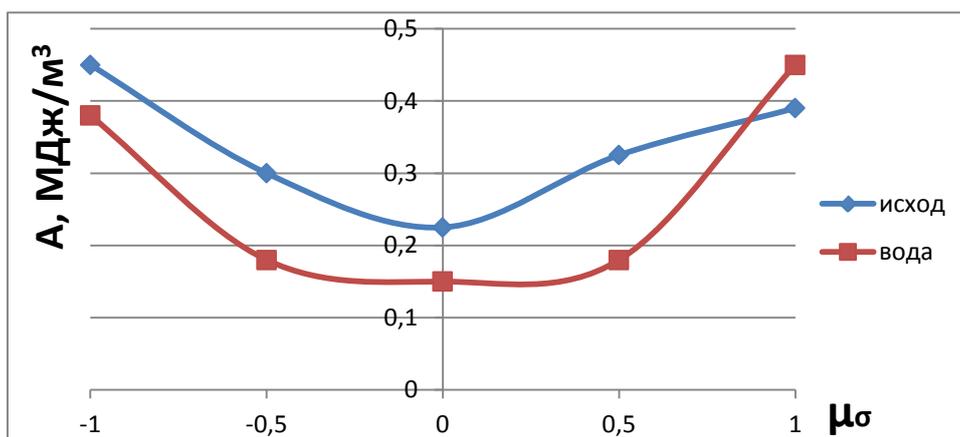


Рис. 8. Зависимость полной энергии деформирования A угля в момент разрушения от вида напряженного состояния

Таким образом, разрушение водонасыщенного угля в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия происходит при минимальных затратах энергии деформирования (локализуется в одной плоскости) и за счет сдвигового механизма разрушения.

Выводы

При водонасыщении песчаников значительно уменьшается их трещиностойкость, что в итоге способствует развитию трещин и, следовательно, созданию новых проводников воды в горном массиве.

Для песчаников и углей при водонасыщении в условиях объемного нагружения происходит уменьшение модулей деформации и сдвига, увеличение коэффициента поперечной деформации, т.е. происходит их пластифицирование, уменьшение энергии деформирования и реализуется сдвиговой механизм разрушения.

В угольном пласте наибольшее влияние на физико-механические свойства углей водонасыщение оказывает в зоне предельного состояния (2 и 3 участки его объемного нагружения).

Существенные изменения физико-механических свойств горных пород при водонасыщении в условиях поля сжимающих напряжений могут привести к потере устойчивости горного массива и активизации сдвижения земной поверхности над выработанным пространством.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Четверик М. С. Теория сдвижения массива горных пород и управление деформационными процессами при подземной выемке угля. [Текст] / М. С. Четверик, Е. В. Андрощук — Днепропетровск : РИА «Днепр-VAL», 2004. — 148 с.
2. Алексеев А. Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. [Текст] / А. Д. Алексеев, В. Н. Ревва, Н. А. Рязанцев — К : Наукова думка, 1989. — 168 с.
3. Забигаило В. Е. Выбросоопасность горных пород Донбасса. [Текст] / В. Е. Забигаило, В. В. Лукинов, А. З. Широков — К : Наукова думка, 1983. — 288 с.

4. Ревва В. Н. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах деформационного состояния. [Текст] / В. Н. Ревва, А. В. Молодецкий, В. В. Завражин, Д. С. Кодберг // Геотехническая механика. — Днепропетровск. — 2010. — № 89. — С. 152—156.
5. Ревва В. Н. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах напряженного состояния. [Текст] / В. Н. Ревва, А. В. Молодецкий, В. В. Завражин, Н. И. Василенко // Физико – технические проблемы горного производства. — Донецк — 2007 — № 10. — С. 81—94.
6. Докукин А. В. Моделирование предельно напряженного состояния угольных пластов. [Текст] / А. В. Докукин, С. Е. Чирков, Б. К. Норель — М. Наука, 1981. — 152 с.
7. Норель Б. К. Изменение прочности угольного пласта в массиве. [Текст] / Б. К. Норель. — М. Наука, 1983. — 128 с.
8. Ревва В. Н. Деформирование и разрушение горных пород и углей при объемном нагружении. [Текст] / В. Н. Ревва, А. В. Молодецкий // Физико-технические проблемы горного производства. — Донецк — 2007 — № 10 — С. 81—94.
9. Alexeev A. D. Stress state effect on the mechanical of coals under true triaxial Compression Conditions. [Текст] / A. D. Alexeev, V. N. Revva, A. V. Molodetski — True Triaxial Testing of Rocks. — Geomechanics Series Volume 4 — 2011 — P. 281—291.