

УДК 622.023.23

С.В. ПОДКОПАЕВ (д-р техн. наук, проф.)  
Донецкий национальный технический университет

### ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Использование высоких давлений для изучения физико-механических свойств осадочных горных пород и их поведение в обстановке, соответствующей современному углепородному массиву, представляет собой сложную задачу, прежде всего из-за учета термодинамической обстановки, в которой ранее образовались эти породы. Доказано, что реальным является разрушение породного массива при разгрузке (снятии напряжений), что так же позволит изучать деформационные свойства осадочных горных пород, но с учетом их влажности и фактора времени.

**Ключевые слова:** углепородный массив, керн, деформирование горных пород, ультразвуковые волны, трехосное сжатие.

Горное дело, опирающееся на эволюционное учение, теснейшим образом связано с экспериментальными исследованиями изучения свойств осадочных горных пород. Такие эксперименты требуют строгого соблюдения условий подобия, которые должны отвечать физико-механическим свойствам горных пород. В экспериментах с искусственными материалами, совершенно невозможно изучать те преобразования внутреннего строения горных пород, которые возникают в обстановке высоких давлений и температур и оказывают существенное влияние на процессы их деформирования. Только с развитием техники высоких давлений представилось возможным осуществлять эксперименты по деформации естественных горных пород в реальной обстановке, отвечающей глубинным процессам углепородного массива, но с учетом определенных граничных условий.

Общеизвестно, что горные породы обладают способностью деформироваться во времени без увеличения напряжений, проявляя при этом свойства ползучести. Изучение свойств ползучести горных пород было положено Д. Филлипсом, Д. Григгсом и К.Штокке [1,2,3]. Результаты выполненных ими исследований указывают на то, что фактор времени существенно влияет на деформативность образцов горных пород. Последние, при длительном воздействии напряжений, проявляют свойства ползучести.

Изучение поведения образцов горных пород, в состоянии трехосного неравнокомпонентного сжатия, открыло огромные перспективы для исследования их напряженно-деформированного состояния и использования полученных данных в практике. Наиболее ранние сведения о поведении горных пород в условиях объемного напряженного состояния приведены в работах Ф.Кике и Л.Адамса [4,5]. Проведенными тогда исследованиями было установлено, что в условиях высоких давлений предел прочности типичных хрупких материалов (к которым следует относить горные породы) возрастает. Экспериментальные образцы приобретали заметную пластическую деформацию, которая при их сжатии всегда сопровождалась сложным изменением объема.

П.В. Бриджмен [6] подтвердил этот эффект и установил, что увеличение объема испытываемых образцов практически обратимо при снятии нагрузки. В предшествующий разрушению период, в структуре некоторых материалов под действием напряжений могут происходить обратимые изменения, которые достигнув некоторой критической величины, вызывают неустойчивость структуры материала и его последующее разрушение при разгрузке.

Подтверждением этих экспериментов являются результаты, описанные в [7], когда испытывали образцы нефтеносных известняков, после разгрузки которых было отмечено их расслоение на тонкие диски, перпендикулярные к оси максимальных сжимающих напряжений.

Приоритет экспериментального изучения механизма разделения кернов горных пород на диски при бурении скважин принадлежит Л.Оберту и Д.Е.Стефенсону [8]. Они доказали реальность разрушения кернов на диски при бурении скважин в породах только при достижении определенного условия напряженности и разрушения горных пород при разгрузке, находившихся в сложонапряженном состоянии трехосного сжатия. Очевидно, что трехосное сжатие образцов горных пород, если компоненты его значительны, приводит к неупругому деформи-

рованию и обуславливает приобретение нового свойства, способность разрушаться при разгрузке.

Для подтверждения рассмотренных нами положений на установке ДонФТИ НАН Украины были проведены эксперименты\*, позволяющие создать трехосное неравнокомпонентное сжатие. Методическая схема заключалась в следующем. Испытания проводились на образцах-кубиках размерами 55х55х55мм из гипса. На основании испытаний 8 образцов рассчитывалось среднее значение предела прочности одноосному сжатию ( $\sigma_{сж.}$ ). Когда образцы помещались в испытательную камеру и создавалось трехосное сжатие по схеме Т.Кармана [9], эксперименты, в данном случае, связывались не с глубиной разработки, а с установленной величиной  $\sigma_{сж.}$ . Образцы выдерживались под нагрузкой в течении 14 сут., когда происходили деформации ползучести, контроль которых осуществлялся индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, по деформациям металлических пластин пресса. Понимая несовершенство таких измерений для оценки действительных деформаций ползучести, их использовали лишь для качественной оценки развития и завершенности при трехосном сжатии. После снятия нагрузки образцы извлекли из испытательной камеры и разместили на специальном стенде. В течении последующих 14 суток регистрировали процесс разгрузки экспериментального образца.

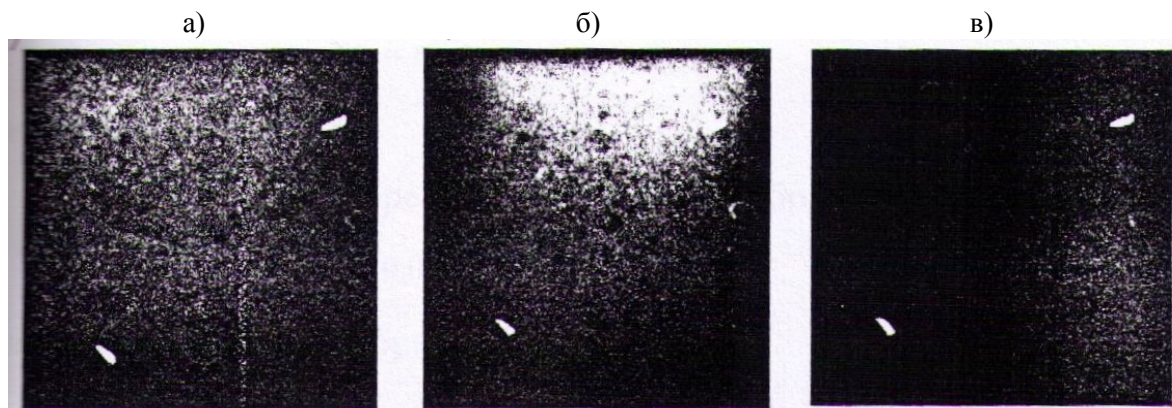
Для того, чтобы «зримо» доказать реальность разгрузки, после сжатия, в образцах (при их изготовлении) разместили два маленьких кусочка свинца. После снятия нагрузки, образцы поместили в рентгеновскую установку (аппарат РУТА-1-1, блок управления ШН, трубки РИДЗ-4) и измерили положение свинцовых включений. Во время эксперимента расстояние от трубки до образца составило 1м, просвечивание производили по 2,5с. [10]. Затем эксперимент повторили после 14 суток.

На рис.1 показан рентгеновский снимок образца гипса до нагружения (а), после снятия напряжений (б) и через 14 суток (в), когда образец находился на стенде в свободном состоянии. Следует отметить, что расстояние между кусочками свинца (беленькие почти треугольники) с 49 мм уменьшилось до 41мм, а затем в результате разгрузки возросло до 48 мм. Эти изменения отмечены даже визуально, они доказывают реальность процесса разгрузки, величина деформаций которого на многие порядки превосходит упругие деформации. Однако этот эксперимент полностью не отражает реальное поведение пород, извлеченных из углепородного массива.

Для доказательства реальности разгрузки образцов горных пород нами были проведены эксперименты по исследованию их деформируемости во времени, но только после снятия напряжений.

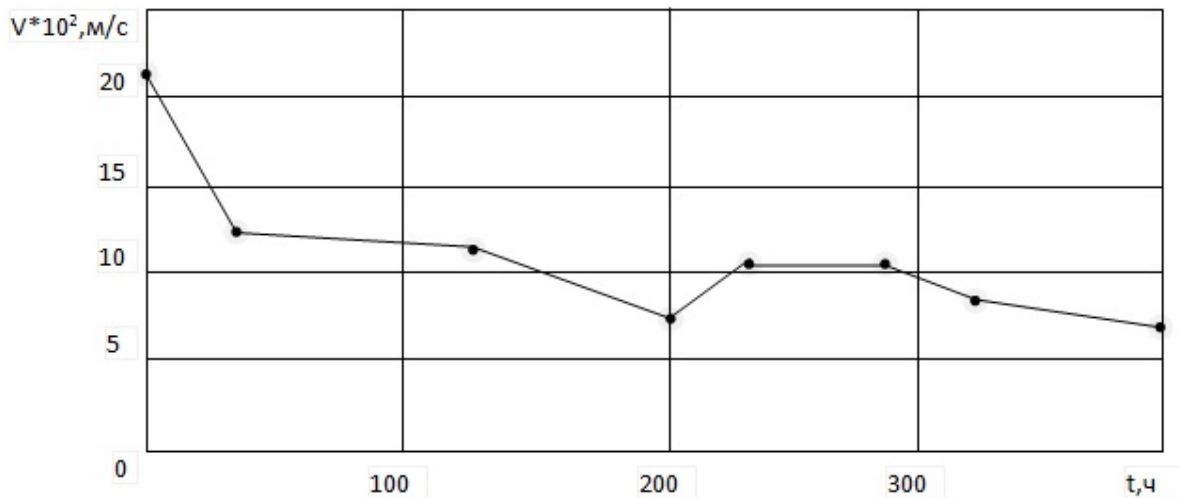
Изготовленные образцы из гипса (3 образца), после определения предела прочности на сжатие, загрузили также по схеме Т.Кармана. Они находились в течение 500 часов в состоянии трехосного неравнокомпонентного сжатия, сопровождающегося деформациями ползучести. После разгрузки образцы поместили на стенд и с помощью прибора УКБ-1М, методом прямого прозвучивания, определяли время прохождения звукового сигнала при частоте ультразвука соответствующей 25кГц. Отсчеты проводились в течение 400 часов.

Эксперименты проводились при участии асп. Д.А. Чепиги (ДонНТУ).



**Рис. 1.** Рентгеновский снимок образца гипса до нагружения (а), после снятия напряжений (б) и через 14 суток, после разгрузки (в)

Обработка экспериментальных данных осуществлялась по методике [11]. По их результатам был построен график изменения скорости прохождения ультразвуковых волн через исследуемый образец во времени (рис.2)

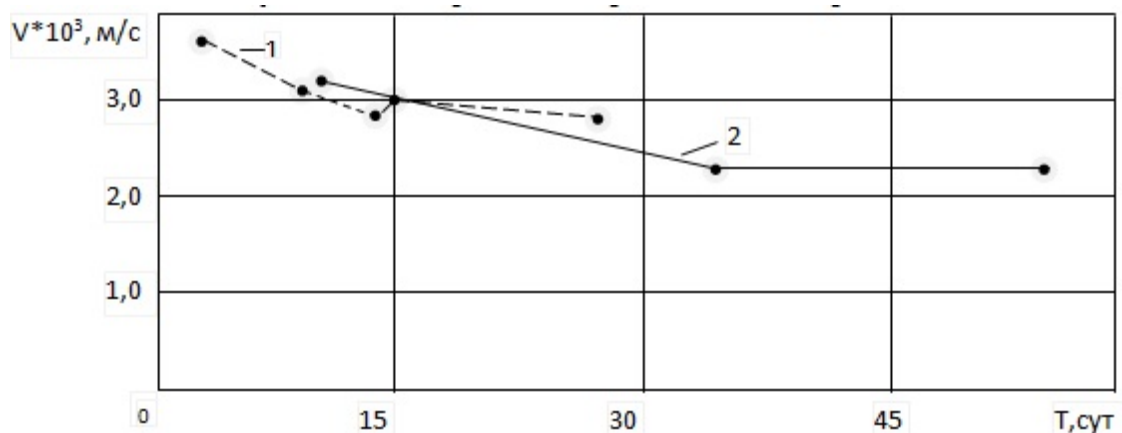


**Рис. 2.** Изменение прохождения ультразвуковых волн в образце из гипса

Представленный график доказывает изменение в структуре исследуемого образца, что подтверждается уменьшением скорости прохождения ультразвуковых волн чистой 25 кГц. Этот процесс разгрузки во времени подтверждает наличие своеобразного эффекта «разрыхления» образца.

Аналогичные эксперименты (в течении 52 суток), были проведены на образцах песчанистого сланца шахты им. А.И. Гаевого (глубина 975м) и глинистого сланца шахты им. А.А.Скочинского (глубина 1026м). Образцы были отобраны из керновой скважины. Результаты экспериментов представлены на рис.3.

Ломаная зависимость 1 указывает на снижение скорости прохождения ультразвуковых волн во времени, подтверждая эффект «разрыхления» песчанистого сланца во времени, после разгрузки. Ломаная зависимость 2 описывает ранее проведенные эксперименты на образцах глинистого сланца шахты им. А.А.Скочинского [12], в которых отмечается такая же закономерность.



**Рис. 3.** Изменение скорости прохождения ультразвуковых волн в песчанистом сланце (1) и глинистом сланце (2)

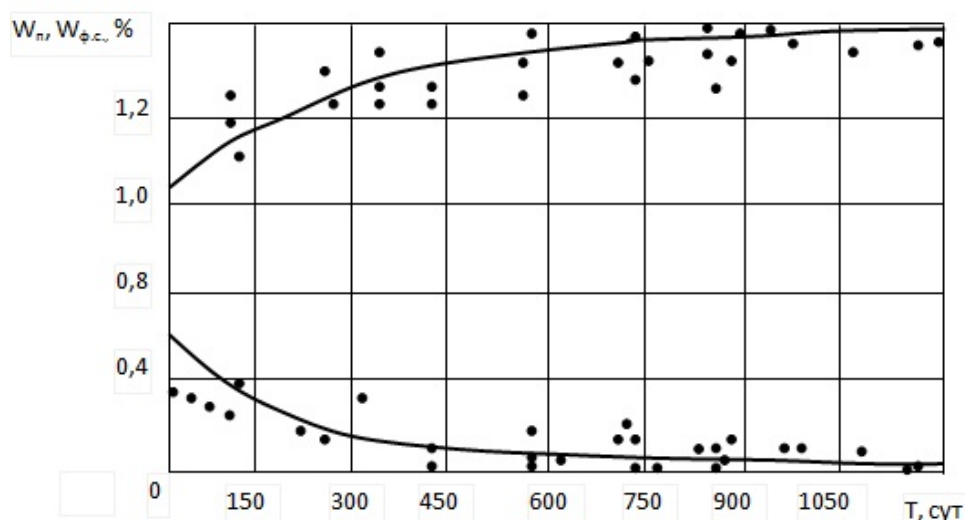
С позиций рассматриваемых задач, это явление может рассматриваться как своеобразное доказательство «структурной перестройки» образцов горных пород, приводящей, с течением времени, не только к увеличению их объема, но и разрушению.

Рассмотрим серию продолжительных экспериментов\*, которые были выполнены на образце песчанистого и глинистого сланца, отобранных с глубины 820м, 975м и 1000м шахт Донбасса. Образцы отбирали за пределами разгружающего влияния горных работ, после колонкового бурения экспериментальных скважин. В основу исследований было положено явление, возникающее при передвижении смачивающей жидкости по капиллярам различных размеров (диаметров) [13].

Эксперименты проводились по следующей методике. Из кернов выбрали 56 проб образцов. Пробы разделяли в лаборатории по группам (7-8 образцов в каждой группе) и содержали их там в течении 1200 суток при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре. По каждой группе образцов измеряли уменьшение их массы до стабилизации. Затем, в соответствии со стандартной методикой (ГОСТ 11014-81) образцы помещали в сушильный шкаф и при  $t=105-110^{\circ}\text{C}$  высушивали в течении одного часа. После взвешивания высушенных образцов устанавливали их физически связанную влажность ( $W_{\text{ф.с.}}$ ). Максимальную влагоемкость  $W_{\text{п.}}$  определяли после насыщения (в течении 10 суток) экспериментальных образцов водой. Эксперименты проводились в течении 1200 суток. Основной смысл экспериментов заключался в оценке уменьшения физически связанной влажности, прироста влажности образцов и влияния на названные процессы их разгрузки. Все взвешивания производились на специальных электронных весах (тип ВЛР-200г ГОСТ 24104-80) с точностью до третьего после единицы знака. При изучении деформирования образцов горных пород изменение их влажности рассматривали не только как физическую характеристику, но и как критерий увеличения их объема и перераспределения соотношения объемов пор соответствующих размеров, но обладающих принципиально различными свойствами.

На рис.4 показано изменение величин максимальной влагоемкости и физически связанной влажности образцов осадочных горных пород от времени после их разгрузки. Установленные зависимости доказывают изменение структуры порового пространства и перераспределение пор размерами  $>10^{-7}\text{м}$  и  $<10^{-7}\text{м}$ , в исследуемых образцах, подтверждая тем самым не только склонность углепородного массива к водо- и газоотдаче, но и его разгрузку и последующее расслоение (разрушение).

Ранее было установлено [13], что в капиллярах диаметром  $10^{-5}-10^{-6}\text{см}$  при наличии электрокинетического потенциала флюид протекать не будет, под каким бы давлением он не находился. Уравнение Лапласа [14] подтверждает эффект увеличения диаметра пор в результате разгрузки образцов осадочных горных пород. Поэтому испарение воды из образцов пористых горных пород, которое было нами установлено, и приобретение воды высушенными образцами этих же пород из атмосферы, доказывает общность природы названных явлений. Подтверждением этого является зависимость роста числа пор размерами  $\geq 10^{-7}\text{м}$  из числа тех, которые раньше были  $<10^{-7}\text{м}$  и, из которых испарение воды ранее было невозможным, что доказывают полученные в лабораторных условиях данные экспериментов (кривые 1 и 2, рис.4).



**Рис. 4.** Зависимости изменения максимальной влагоемкости  $W_n$  (1) и физически связанной влажности  $W_{ф.с.}$  (2) от времени образцов осадочных горных пород шахт Донбасса

В результате проведенных исследований было установлено уменьшение прочности образцов на 19-24%, что свидетельствует об их структурном ослаблении. Однако, в данном случае, структурные ослабления не являются поверхностями скольжения и разрыва непрерывности деформаций и смещений, а являются лишь элементами структуры массива горных пород, снижающих прочностные показатели. Необходимо отметить, что за весь период проведения исследований, некоторые образцы расслоились (разделились на диски).

Таким образом, в ходе выполненных исследований было установлено, что при изучении деформирования горных пород, реальным является разрушение породного массива не только в результате роста напряженности, но и при его разгрузке. В результате структурного ослабления массива на больших площадях (при наличии поверхностей скольжения), разрушение будет сопровождаться расслоением горных пород. В связи с этим, совершенно очевидной становится необходимость более глубокого экспериментального изучения природы и особенностей разрушения образцов осадочных пород при разгрузке, в том числе с учетом фактора времени и изменения их влажности. Эксперименты необходимо проводить на образцах своевременно извлеченных из массива.

**Выводы.** Использование высоких давлений для изучения физико-механических свойств осадочных горных пород и их поведения в обстановке, соответствующей современному угленосному массиву, представляет собой сложную задачу, прежде всего из-за термодинамической обстановки, в которой ранее образовались горные породы. Эффекты кратковременного приложения высоких давлений к горным породам в лабораторных условиях совсем иные, чем полученные в результате продолжительного их воздействия в натуральных условиях. В связи с этим, экспериментальное изучение деформирования горных пород может преследовать различные задачи исследований. Очевидно, горную породу можно рассматривать как материал, обладающий физико-механическими, деформационными свойствами, которые изменяются в зависимости от обстановки и, как модельный материал, используемый исключительно для получения качественной картины решаемой задачи исследований.

#### Библиографический список

1. Phillips D.W. Tectonics of Mining. Colliery Eng / D.W. Phillips. –1948 –p.293-297.
2. Creep of rocks. J.Geol. / D.T. Griggs. –1937.–Vol.47.- p.12-14
3. Ржаницын А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын. – М.:Стройиздат.-1968.-415с.
4. Kick F. Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre. Z.Verein.dtsch.Ing. / F. Kick -1932.-№10.-p.26-39.
5. Adams L.H. Philos.Trans.london. / L.H. Adams. -1901.- p.22-40
6. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. / П.В. Бриджмен. – М.:Изд-во иностр.лит-ры, 1955.- 440 с.

7. Бузер Г.Д. Влияние поровой жидкости на деформационное поведение горных пород при трехосном сжатии / Г.Д. Бузер, К.Х., Хиллер, С. Серденгекти // Механика горных пород. – М.:Недра, 1966.- с.372-406
8. Разрушение. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1973. – т.1. – 616с.
9. Ставрогин А.Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. – СПб.: Наука, 2001.- 343 с.
10. Линденбратен Л.Д. Медицинская радиология / Л.Д. Линденбратен, Ф.М.Лен. - М.: Медицина, 1986. – 368с.
11. Лабораторный практикум по курсу «Физика горных пород и процессов» / И.Ф.Потапкин, А.Г.Томасов, Н.Н.Гавриш и др. – Донецк: ДПИ, 1991. – 43 с.
12. Николин В.И. Особенности проявления горного давления на глубинах 1200 м / В.И. Николин, Н.В.Игнатович, В.А. Шепеленко // Уголь Украины. – 1994. - №5.- с.12-15.
13. Харин С.Е. Физическая химия. / С.Е.Харин. - К.:КГУ, 1961. – 424 с.
14. Миронов Н.П. Механизм движения жидкости в угольном пласте / Н.П.Миронов // Нагнетание воды в угольные пласты для повышения безопасности горных работ. – М.:Недра, 1965. – с.65-73.

#### References

1. Phillips D.W. (1948). Tectonics of Mining. Colliery Eng. - p. 293 - 297.
2. Creep of rocks. J.Geol. / D.T. Griggs. -1937.-Vol.47.- p.12-14
3. Rzhantsyn A.R. (1968). Theory of Creep.- Moscow.: Stroyizdat.- 415 p.
4. Kick F. Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre. Z.Verein.dtsch.Ing. / F. Kick -1932.-№10.-p.26-39.
5. Adams L.H. (1901). Philos.Trans.london.- p. 22-40
6. PV Bridgman.(1955). The study of large plastic deformation and fracture. - Moscow.: Publishing house inostr.lit-ry.- 440 p.
7. Boozer G.D., Hiller K. H., Serdengekti S. (1966) Influence of pore fluid on the deformation behavior of rocks at compression / Rock mechanics. - Moscow: Nedra. - p .372- 406
8. Destruction. Microscopic and macroscopic fracture mechanics fundamentals (1973). – Volume1. Moscow. – 616 p.
9. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. (2001). Experimental physics and rock mechanics. SPb.: Nauka.- 343 p.
10. Lindenbraten L.D., Len F.M. (1986). Nuclear Medicine. - Moscow: Medicina, 1986. – 368 p.
11. Physics of rocks and processes (1991) - Donetsk. PDI. - 43 p.
12. Nikolin V.I., Ignatovich N.V., Shepelenko V.A. (1994). Features of rock pressure at a depth of 1200 m / Ugol Ukrainy. - № 5.- p.12-15.
13. Harin S. E. (1961). Physical chemistry. - Kyiv.: KSU. - 424 p.
14. Mironov N.P. (1965). The mechanism of liquid movement in the coal. Injection of water in coal seams to improve the safety of mining operations. - Moscow: Nedra. - p. 65-73.

Надійшла до редакції 07.04.2016

#### С.В. Подкопасьв

Донецький національний технічний університет

#### ЭКСПЕРИМЕНТЫ З ДЕФОРМАЦИИ ГИРСКИХ ПОРИД

Використання високого тиску для вивчення фізико-механічних властивостей осадових гірських порід і їх поведінки в умовах, що відповідають сучасному вуглепородному масиву, являє собою складну задачу, перш за все через врахування термодинамічних умов, за яких раніше утворилися ці породи. Доведено, що реальним є руйнування породного масиву при розвантаженні (зняття напруги), що також дозволить вивчати деформаційні властивості осадових гірських порід, але з урахуванням їх вологості і фактора часу.

**Ключові слова:** вуглепородний масив, керн, деформування гірських порід, ультразвукові хвилі, тривісне стиснення.

**S. Podkopayev**

Donetsk National Technical University

#### ABOUT THE EXPERIMENTS ON ROCKS DEFORMATION

Using high pressures for learning of physical and mechanical characteristics of sedimentary rocks and their behavior in conditions of modern coal rocks massif is a difficult task. First of all, it is because of thermodynamic conditions where these rocks were formed, and that is impossible to recreate it in laboratory. The experiments made in Donetsk National Technical University on gypsum, clay shale and sandy shale artificial samples of Donbass mines prove the idea. Learning the gypsum samples' deformation the reality of their unloading after a stress relief was proved as well as a velocity decrease of sound waves passing through them. Experimental study of the value of the maximum water capacity change and of physically bounded moisture samples of clay and sandy shales of Donbass mines after their unloading proves the change of a pore volume structure. The experiments that were conducted set a decrease of 19-24 % of the rock samples' strength, of the velocity of ultrasonic waves of 25 kGz passing through them, the redistribution under dimensions  $>10^{-7}$  m and  $<10^{-7}$  m, the separation and destruction to disks of some samples. It proves not just a tendency of a coal rock massif to water and gas output but also its stratification (destruction). The experiments prove the reality of destruction of a coal rock massif not just as a result of the growth of its tension, but also when it is unloaded, after a stress relief. The effects of short high pressure application to the rocks in laboratories are absolutely different to those got in result of their long influence in natural conditions. The performed researches made when studying the deformation of the rocks samples prove the idea.

**Keywords:** coal rocks massif, core, rocks deformation, ultrasonic waves, triaxial compression.