

*Сиидов В.Н.,  
к. т. н. Пупков В.С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО РАСПОРА РАЗРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

*Експериментальним шляхом встановлено модуль деформації та коефіцієнт бокового розпору роздробленої породи для пісковика, аргіліту та алевроліту.*

***Ключові слова:** модуль деформації, коефіцієнт бокового розпору, роздроблена порода, пісковик, аргіліт, алевроліт.*

*Экспериментальным путем установлены модуль деформации и коэффициент бокового распора раздробленной породы для песчаника, аргиллита и алевролита.*

***Ключевые слова:** модуль деформации, коэффициент бокового распора, раздробленная порода, песчаник, аргиллит, алевролит.*

В настоящее время одним из эффективных методов исследования напряженно-деформированного состояния высокометаморфизированного угленосного массива является численное моделирование с использованием механических характеристик, полученных на базе лабораторных исследований [1]. Механические характеристики пород подработанного пространства, разрушенных под влиянием очистных работ, существенно отличаются от аналогичных характеристик нетронутого массива [2]. Анализ исследований по рассматриваемому вопросу [2-3] показывает, что всеми авторами отмечается заметное снижение модуля деформации разрушенных материалов. Однако отсутствуют достоверные данные, касающиеся коэффициента бокового распора для разрушенной породы. Поскольку точность решения задач геомеханики методом конечных элементов зависит от корректно заданных обоих коэффициентов, то установление их величин является актуальной задачей. Целью проводимых исследований на базе образцов основных пород антрацитовых шахт Украинского Донбасса является определение основных механических характеристик: модуля деформации и коэффициента бокового распора.

При экспериментальном определении механических характеристик раздробленной породы основная сложность заключается в том, что образцы должны размещаться в ограничивающей их оболочке [4]. Ис-

пытания разрушенной породы выполняются в тонкостенной металлической цилиндрической оболочке (рисунок 1, а), для которой предварительным тарированием получена зависимость связи бокового давления с его деформациями. Анализ производился путем замены оболочки эквивалентным боковым давлением (рисунок 1, б).

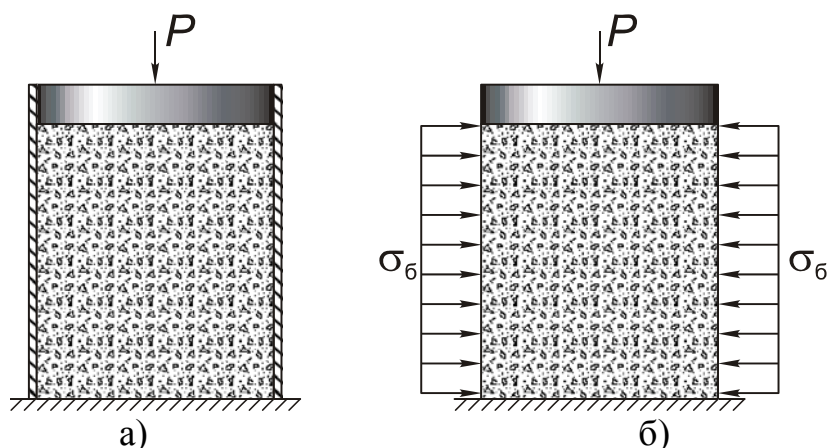


Рисунок 1 – Схема экспериментальных испытаний разрушенной породы: а – реальная; б – расчетная.

Экспериментальная установка (рисунок 2) состоит из основных узлов:

1 – тонкостенная металлическая труба, внешний и внутренний диаметры соответственно  $D = 50$ ,  $d = 48$  мм; 2 – жесткий металлический цилиндр; 3 – фиксирующая обойма; 4 – верхнее фиксирующее кольцо; 5 и 6 – поршни соответственно верхний и нижний  $d = 47,9$  мм; 7 – тензометрический датчик бокового давления; 8 – датчик; 9 – отверстие для вывода контактов датчика 8 к усилителю; 10 и 11 – траверсы силовой установки соответственно подвижная и неподвижная; 12 – исследуемая навеска породы.

Экспериментальная модель нагружается с использованием машины УИМ-50м (рисунок 3).

В процессе экспериментальных исследований фиксировали усилия сжатия  $P$ , возникающие при этом радиальные напряжения  $\sigma_r$  и усадку образца  $\Delta h$ . Сила сжатия регистрировалась по показаниям силоизмерителя машины УИМ-50м. Усадка образца определялась по показаниям индикатора.

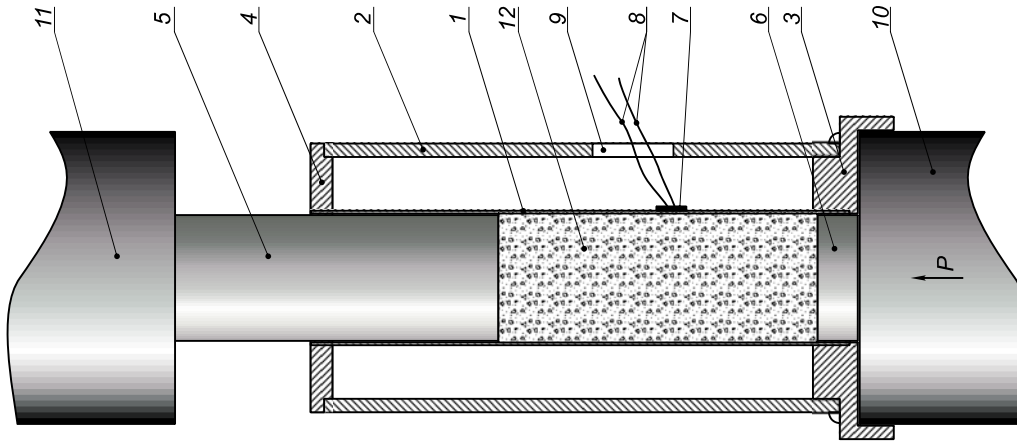
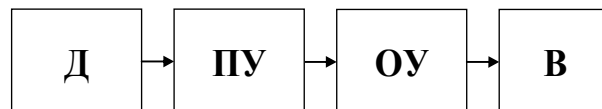


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки



Рисунок 3 – Внешний вид регистрирующего комплекса

Регистрация радиальных напряжений осуществлялась за счет специально разработанного комплекса регистрирующей аппаратуры (рисунок 4).



Д – тензометрический датчик; ПУ – пред усилитель сигнала;  
 ОУ – оконечный усилитель; В – цифровой вольтметр.

Рисунок 4 – Общая схема регистрирующего комплекса

Датчик радиальных напряжений представляет собой тензорезистор, приклеенный к внешней стороне тонкостенного цилиндра. В работе [5] показано, что такие датчики пригодны для измерения напряжений в диапазоне 1...100 МПа.

Тарирование полученной измерительной системы производилось путем ее гидравлического испытания давлением жидкости согласно схеме, представленной на рисунке 5.

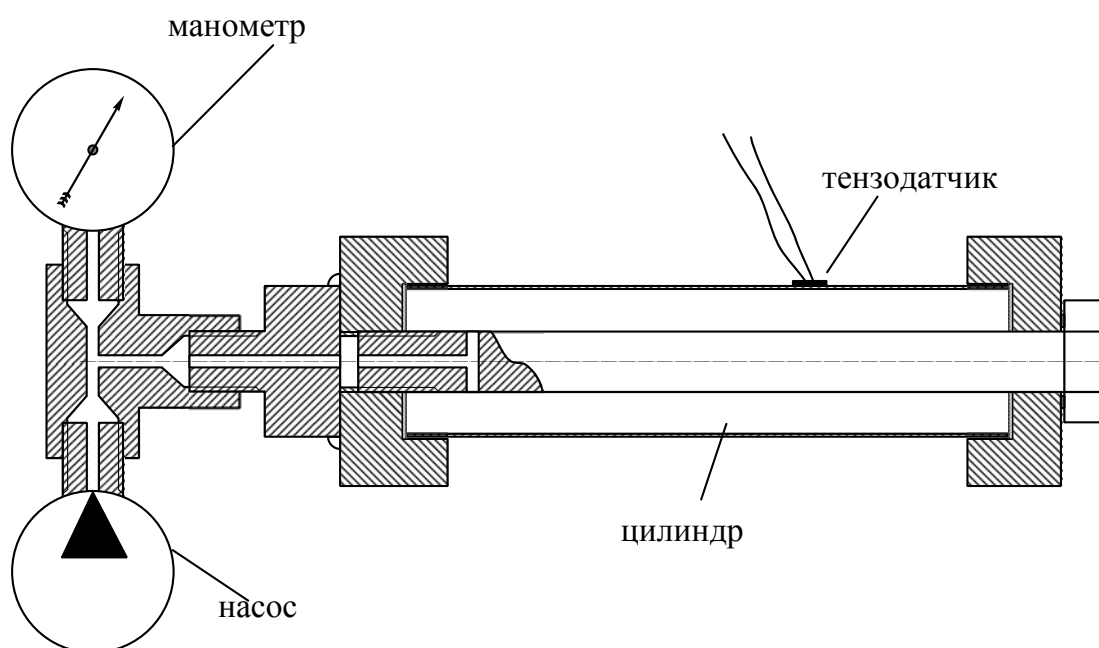


Рисунок 5 – Общая схема тарировки датчика (тензорезистора) радиальных напряжений

Изменение давления в 1 МПа соответствует изменению напряжения на выходе усилителя  $\Delta U = 0.062 \text{ В}$ , с погрешностью 9 %.

При проведении эксперимента измерения производились после предварительной усадки образца до показаний силоизмерителя  $P = 1 \text{ кН}$ . Эта процедура необходима для устранения неравномерности насыпки материала.

В качестве варьирующего параметра приняты показания силоизмерителя. Шаг измерений принят равный  $\Delta P = 5 \text{ кН}$ . При этом прирост напряжений сжатия определялся по формуле:

$$\Delta \sigma_{сж} = \frac{\Delta P}{A}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения верхнего поршня,  $\text{м}^2$ .

Соответствующее приросту  $\Delta\sigma_{сж}$  изменение бокового давления определялось по формуле:

$$\Delta\sigma_{\delta} = \frac{(U_{\kappa} - U_{\eta})}{\alpha} \cdot 10^6, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – эмпирический коэффициент пересчета показаний в результате тарировки ( $\alpha = 0.062$ ).

Прирост относительной деформации образца, при изменении давления сжатия  $\Delta\sigma_{сж}$  определялся по формуле:

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{h_{\eta} - h_{\kappa}}{H - h_{\eta}}, \quad (3)$$

где  $h_{\eta}$  и  $h_{\kappa}$  – величины усадки образца, соответственно начальная и конечная, мм;

$H$  – начальная высота насыпки, мм.

Допуская, что тонкостенный цилиндр подвержен преимущественно деформациям растяжения, представляется возможным найти линейную связь между  $\Delta\sigma_{\delta}$  и тангенциальными растяжениями цилиндра  $\Delta\varepsilon_m$  [6]:

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{\Delta\sigma_{\delta} \cdot d_{\text{ц}}}{2 \cdot \delta_{\text{ц}} \cdot E_{\text{ц}}} = \frac{\Delta\sigma_{\delta}}{\varphi}, \quad (4)$$

где  $\varphi = \frac{E_{\text{ц}} \cdot 2\delta_{\text{ц}}}{d_{\text{ц}}}$ , ( $\varphi = 0,833 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ).

Если рассматривать процесс усадки раздробленной породы как деформацию цилиндра нагруженного осевой силой и боковым давлением, то

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{\delta}, \text{ Па}, \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_{\delta}, \text{ Па}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$U = \frac{1-\mu}{E} \cdot \sigma_{\delta} \cdot r - \mu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \cdot r, \text{ м},$$

где  $\sigma_\theta$  – тангенциальные напряжения, Па;  
 $U$  – радиальные деформации образца, м;  
 $\mu$  – коэффициент бокового распора;  
 $E$  – модуль деформации, Па;  
 $r$  – текущий радиус, м.

Зависимости для относительной тангенциальной ( $\varepsilon_\theta$ ) и продольной ( $\varepsilon_z$ ) деформаций имеют вид:

$$\varepsilon_\theta = \frac{U}{\delta} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_\theta - \mu \cdot (\sigma_\theta + \sigma_z)], \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} \cdot (\sigma_z + \sigma_\theta) = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \mu \cdot 2 \cdot \sigma_\theta]. \quad (7)$$

Поскольку из условия деформации цилиндра известна связь между  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$ , то переходя к записи уравнений в приращениях рассматриваемых величин на каждом шаге эксперимента, можно составить уравнения:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\Delta \sigma_z - \mu \cdot 2 \cdot \Delta \sigma_\theta], \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \sigma_\theta}{\varphi} = \frac{1}{E} \cdot [\Delta \sigma_\theta - \mu \cdot (\Delta \sigma_z + \Delta \sigma_\theta)]. \quad (9)$$

Решая уравнения (8) – (9) находим:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta \sigma_\theta \cdot \Delta \sigma_z}{\varphi \cdot \Delta \varepsilon_z} + \Delta \sigma_\theta}{\left[ \frac{2 \cdot (\Delta \sigma_\theta)^2}{\varphi \cdot \Delta \varepsilon_z} + \Delta \sigma_z + \Delta \sigma_\theta \right]}; \quad (10)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma_z - 2\mu \cdot \Delta \sigma_\theta}{\Delta \varepsilon_z}. \quad (11)$$

При определении механических характеристик экспериментальные исследования выполнялись для трех основных типов пород (алевролит, аргиллит, песчаник) с крупностью их фракции 2,5-5 мм. Эксперимент проводился тремя сериями. Усредненные данные по результатам экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Механические характеристики разрушенных пород

Тип породы	Коэффициент бокового распора $\mu$	Модуль деформации $E$ , МПа
Песчаник	0,29	22200
Алевролит	0,43	9500
Аргиллит	0,47	6500

На основании проведенных экспериментов установлено, что величина модуля деформации разрушенных пород для аргиллита, алевролита и песчаника в среднем соответственно в 3.8, 2.8 и 1.6 раза меньше, чем модуль деформации этих пород в массиве. Величины коэффициентов бокового распора этих уплотненных пород в 1.9-2.1 раз больше, чем в массиве. При этом коэффициент остаточного разрыхления пород составляет 1.01-1.03.

Снижение значения модуля деформации хорошо согласуется с уже известными данными. Увеличение значения коэффициента бокового распора можно объяснить дискретным строением разрушенной породы, что допускает смещение отдельных фрагментов относительно друг друга. Тем самым создавая предпосылки для увеличения боковых деформаций образца за счет перемещения отдельных частиц материала в направлении, перпендикулярном прилагаемому усилию сжатия. В дальнейших исследованиях предполагается проверить полученные данные на образцах с другими размерами фрагментов, а также учесть трения материала образца о стенки ограждающей оболочки.

### Библиографический список

1. Болучевский В.И. Особенности деформирования горного массива под влиянием очистных работ / Болучевский В.И., Ведяшкин А.С., Спроге А.О. – Уголь. – 1988. – №11. – С. 10-12.
2. Зборщик М.П. Свойства пород зон разгрузки / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // Разраб. месторождений полез. ископаемых. Респ. межвед. науч. – техн. сб. – Киев: "Техніка", 1991. – Вып. 90. – С. 28-36.
3. Андранович В.А. Определение модуля деформации разрушенных пород / В.А. Андранович, Ю.В. Громов, Г.А. Иванов. // Уголь Украины. – 1984. – № 2. – С. 18-19.

4. *Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш. – М.: Недра, 1969. – 392 с.*

5. *Элдер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами / В.Элдер, Л. Вальтер. – М.: Мир, 1974. – 286 с.*

6. *Тимошенко С.П. Пластины и оболочки / С.П.Тимошенко, С.Войновский-Кригер. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1963. – 635с.*

***Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Борзыхом А.Ф.***