

УДК 538.951-405

**Я. В. Шажко**, канд. техн. наук, **Л. Д. Ожегова**, **К. И. Соколов**, **Д. А. Нескреба**  
ГБУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, ДНР  
Тел. / Факс: +7 949 322 16 74; E-mail: syarilo@mail.ru

## УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД, УГЛЕЙ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

*В статье приведены данные по разработанной установке для определения прочности горных пород и углей строительных материалов на одноосное сжатие для фрагментированных материалов произвольной формы. Описаны ее технические характеристики и принципы работы.*

**Ключевые слова:** одноосное сжатие, прочность, горные породы, уголь, фрагментированный материал, технические характеристики.

**Ya. V. Shazhko, L. D. Ozhegova, K. I. Sokolov, D. A. Neskreba**

## INSTALLATION FOR DETERMINING THE STRENGTH OF ROCKS, COALS AND BUILDING MATERIALS FOR UNIAXIAL COMPRESSION

*The article presents data on the developed installation for determining the strength of rocks and coals of building materials for uniaxial compression for fragmented materials of arbitrary shape. Its technical characteristics and principles of its operation are described.*

**Keywords:** uniaxial compression, strength, rocks, coal, fragmented material, technical characteristics.

### 1. Введение

Определение прочности природных материалов в некоторых случаях представляет собой достаточно сложную задачу. Эта задача связана с неоднородностью состава изучаемых пород и большим количеством различных структурных дефектов, величина которых варьируется от макро- до наноразмерных. Стандартные процедуры, используемые при определении прочности материала согласно общепринятым методам (ГОСТ 24941-81 [1], ГОСТ 21153.8-88 [2], ГОСТ 21153.2-84 [3], ГОСТ 21153.3-85 [4], ГОСТ 25.503-97 [5] и т.д.), оказываются не всегда применимы вследствие сложности обработки образцов до надлежащего уровня, обеспечивающего точность и воспроизводимость результатов измерений.

При таких обстоятельствах оценку прочности допустимо производить, располагая образцами данного материала во фрагментированной форме. Это могут быть как образцы каменного угля, измельченного в процессе добычи, так и строительных материалов, разрушенных в силу каких-либо причин. Несмотря на произвольную форму и размер образцов, неприменимых при обычных испытаниях на сжатие, они, тем не менее, могут быть использованы для получения информации о прочности исходного, монолитного материала.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Одной из важнейших характеристик любого твердого тела является прочность, или способность материала сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием нагрузок.

Для горных пород и углей эта задача осложняется неоднородностью состава материала и большим количеством различных структурных дефектов, величина которых варьируется от макро- до наноразмерных.

Анализ существующих теорий прочности показывает, что базовыми параметрами определения прочности на одноосное сжатие является модуль упругости, значение которого можно получить только для образцов правильной формы. В противном случае достоверность результата будет неоднозначной. Изготовление образцов правильной геометрической формы для проведения испытаний на одноосное сжатие из угля и осадочных горных пород невозможно или крайне затруднено.

В Институте разработаны теоретические основы нового способа определения прочности угольного вещества [6, 7].

Для реализации разработана установка для определения прочности горных пород, углей и строительных материалов на одноосное сжатие (далее - УОП) рис. 1.

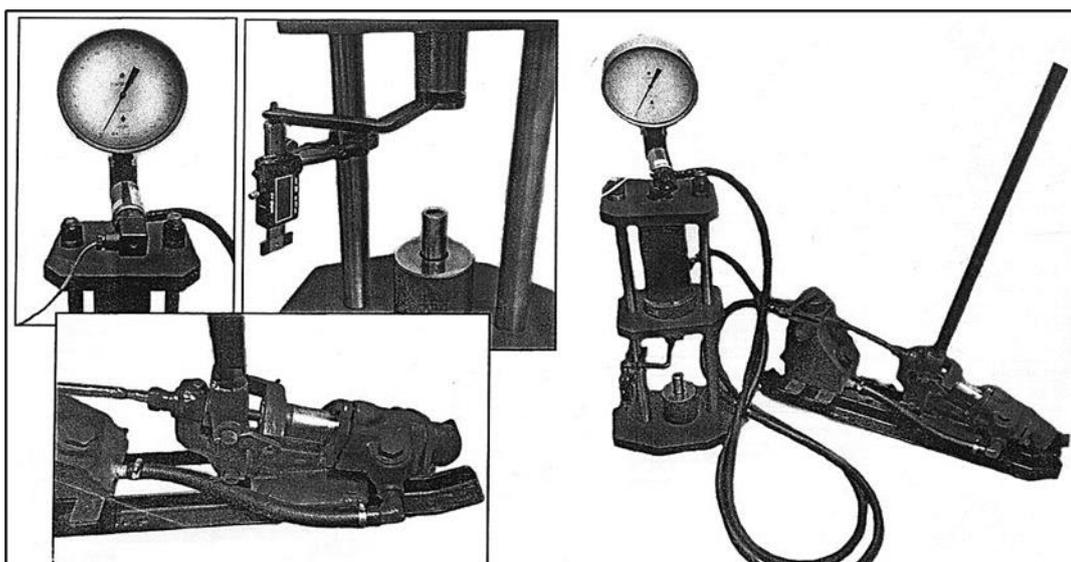


Рисунок 1. Экспериментальная установка по определению прочности углей и горных пород различной литологии и строительных материалов на одноосное сжатие

Техническая характеристика установки УОП представлена далее:

1. Габаритные размеры, мм  
высота – 1000  
длина – 300  
ширина – 220
2. Вес установки (без учета веса гидравлического насоса), кг – 36,8
3. Количество осей сжатия, шт. – 1
4. Количество цилиндров, шт. – 1
5. Усилие, развиваемое цилиндром, МПа – 160
6. Давление предварительного нагружения, МПа – 0,03
7. Давление при максимальном нагружении, МПа – 32
8. Скорость движения штока цилиндра, мм/с  
минимальная – 0,02  
максимальная – 6,03
9. Контейнер
10. Габаритные размеры, мм  
высота – 80  
диаметр – 80
11. Рабочая камера, мм

высота – 70

диаметр – 25

12. Максимальное рабочее давление в камере контейнера, МПа – 800

13. Датчик давления

тип – ДД-40/2-УХЛ

напряжение питания, В – 15÷30

выходной канал, мА – 0÷5

частотный диапазон, Гц – 1000

точность измерения, % – 0,25

количество, шт. – 1

14. Датчик перемещения

тип – ИИМГЦ

точность измерения, мм – 0,01

диапазон измерений, мм – 0÷35

выходной сигнал – цифровой

количество каналов, шт. – 1

количество параметров записи – 1

вид записи – цифровой графический

Устройство установки рис. 2.

Установка состоит из основания 3, в нем закручиваются две колонны 6, в которых устанавливают плиту нижнюю 4, а затем в углублении нижней плиты 4 монтируют гидроцилиндр 10. Для его фиксации на колоннах 6 одевают плиту верхнюю 5 и с помощью гаек 9 и резьб на колоннах 6 собирают данный узел.

На гидроцилиндр 10 в верхней части монтируют тройник 7, к которому подводят металлорукав 13, а также манометр 14 и датчик давления 15, а в подштоковую полость гидроцилиндра 10 от плунжерного насоса 16 монтируется второй металлорукав 17.

На шток гидроцилиндра 10 устанавливают кронштейн 2 и фиксируют его ограничителем 8.

На одну из колонн 6 устанавливают зажим 11, на котором закреплен датчик перемещения 12.

В рабочую зону устанавливают контейнер 1, совмещая его с осью штока гидроцилиндра 10.

Контейнер 1 состоит из следующих деталей – штока, заглушки и самой камеры для загрузки исследуемого материала.

Высокое давление в камере контейнера 1 создается при сжатии определенного объема исследуемого материала (фракции угля) в результате перемещений штока в контейнере. По мере опускания штока контейнера 1 материал сжимается, объем его уменьшается, а давление в контейнере растет.

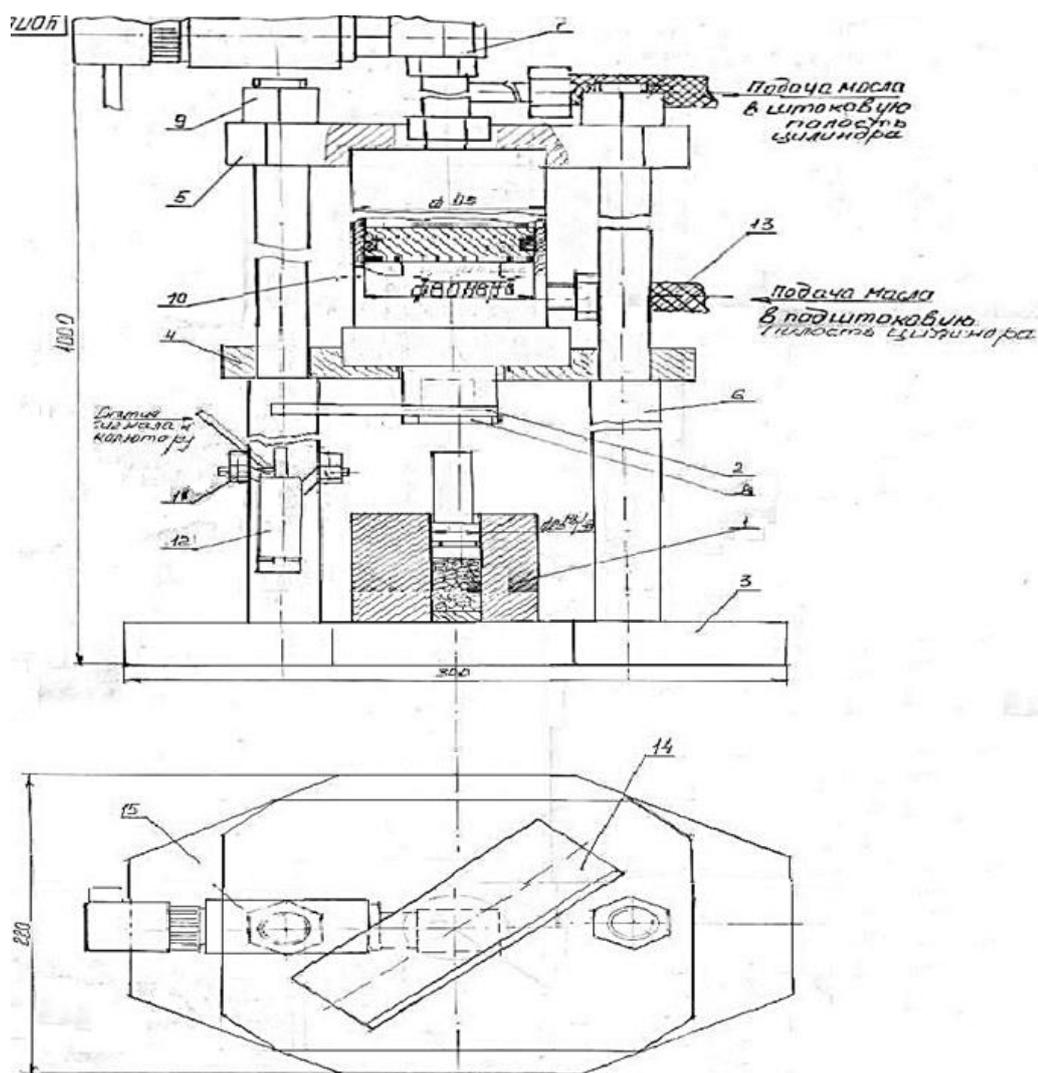


Рисунок 2. Конструкция УОП

Величина напряжений в деформируемом материале:

$$\sigma = \frac{D_{Г.Ц.}^2}{D_{ш}} \cdot K \cdot N_g \cdot Ц_g, \quad (1)$$

где  $D_{Г.Ц.}$  – площадь штока гидроцилиндра, см<sup>2</sup>;

$D_{ш}$  – площадь штока камеры контейнера, см<sup>2</sup>;

$N_g$  – показание манометра, ед.;

$Ц_g$  – цена деления манометра, МПа.

$K$  – коэффициент трения в штоке контейнера ( $K=1,15$ ).

Принцип действия установки УОП

Сама установка состоит из силового блока, на котором размещены регистрирующие элементы – датчики давления и перемещения, а также контейнер с исследуемым материалом и ручным гидравлическим насосом.

Работа на установке УОП осуществляется следующим образом. В рабочую камеру устанавливается собранный контейнер с измельченным материалом (в данном случае с углем) заданной фракции. После этого подается напряжение на датчики давления и перемещения с выводом их сигналов на регистрирующие элементы с записью на компьютере. Ручным насосом создается давление, которое по металлорукаву поступает в верхнюю полость гидроцилиндра, а шток с кронштейном и ограничителем перемещаются вниз. Затем кронштейн нажимает на датчик перемещения, а шток гидроцилиндра с ограничителем давит на шток контейнера, тем самым создавая заданное давление в камере контейнера с углем. С помощью ЭРА переключают давление на металлорукав в подштоковую полость гидроцилиндра, шток с кронштейном поднимаются вверх и идет разгрузка контейнера с углем. В дальнейшем рабочий цикл можно повторять с измененными параметрами нагрузки.

Расчет гидроцилиндра на прочность

Расчет цилиндра, нагруженного максимальным внутренним давлением, постоянным по длине.

По граням элемента трубы, выделенного двумя радиальными и двумя цилиндрическими сечениями, ввиду симметрии, возникают только нормальные напряжения, которые рассчитываются по формулам:

$$\sigma_r = \frac{P_1 r_1^2 - P_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(P_1 - P_2)(r_1^2 - r_2^2)}{(r_2^2 - r_1^2)\rho^2}, \tag{2}$$

$$\sigma_t = \frac{P_1 r_1^2 - P_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(P_1 - P_2)(r_1^2 - r_2^2)}{(r_2^2 + r_1^2)\rho^2}, \tag{3}$$

Условие прочности рассматриваемой детали имеет вид:

$$\sigma_{экр} \leq [\sigma_p] = \frac{\sigma_{пред}}{n}, \tag{4}$$

где  $[\sigma_p]$  – допускаемое напряжение при одноосном растяжении;

$\sigma_{пред}$  – допускаемое напряжение при одноосном растяжении;

$n$  – коэффициент запаса.

$$n = \frac{95}{80} = 1,18$$

Запас прочности детали соответствует прочности цилиндра исходя из условия для стали 45 ГОСТ 1050-88:

$$\sigma_{экр} = \frac{\sigma_{пред}}{n} = \frac{58}{1,18} = 49,15 \text{ кгс/мм}^2$$

$$58 \leq 49,15 \text{ кгс/мм}^2$$

Расчет колонн

Максимальное усилие, развиваемое установкой, равно:

$$P = 320 \cdot 3,14 \cdot 4,0^2 = 16 \text{ тс}$$

Тогда на одну колонну будет действовать усилие

$$P_1 = \frac{P}{2} = \frac{16}{2} = 8 \text{ тс}$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр метрической резьбы М24х3-Н7

$$d_1 = 20,7 \text{ мм} = 2,7 \text{ см}$$

$$[\sigma]_ф = \frac{2P_1}{\pi d_1^2} = \frac{2 \cdot 8000}{3,14 \cdot 4,28} = \frac{16000}{13,44} = 1190 \text{ кгс/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma]_p = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n}$$

$$\text{Для стали 40ХН } \sigma_{\text{пред}} = 80 \text{ кгс/мм}^2$$

Коэффициент запаса прочности ( $n$ ) равен:

$$n = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{[\sigma]_p} = \frac{80}{11,9} = 6,7$$

Расчет витков резьбы колонн на прочность

Витки рассчитываются на срез. Напряжение среза в основании витка гайки равно:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P_1}{\pi d_0 k S Z}, \quad (5)$$

где  $d_0$  – наружный диаметр резьбы;

$k$  – коэффициент полноты резьбы (для метрической резьбы  $k = 0,9$ );

$S$  – шаг резьбы;

$Z$  – число работающих витков.

$$[\tau]_{\text{ср}} = 0,1 \div 0,15 \sigma_T$$

$$d_0 = 24 \text{ мм} = 2,4 \text{ см}$$

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{8000}{3,14 \cdot 24 \cdot 0,9 \cdot 3 \cdot 10} = 3,93 \text{ кгс/мм}^2$$

Для стали 40ХН  $[\tau] = 12 \text{ кгс/мм}^2$

Если  $\tau_{\text{ср}} = 3,93 < 12 \text{ кгс/мм}^2$ , значит условие прочности выполняется.

Расчет контейнера и его деталей

В установке для гидростатической обработки материалов контейнер высокого давления является главным звеном. Нами применяется однослойный контейнер. Практика эксплуатации данных типов контейнеров показала долговечность и простоту изготовления такой конструкции, кроме того, они успешно работают при давлениях, не превышающих 800÷1000 МПа. Приведем численный пример расчета контейнера. Расчет производится по формулам, справедливым только в пределах упругих деформаций применительно к толстостенным сосудам.

Исходные данные

Внутренний диаметр контейнера

$$d = 25 \text{ мм}$$

Наружный диаметр контейнера

$$D = 80 \text{ мм}$$

Число слоев

$$n = 1$$

Материал втулки контейнера (сталь 40ХН)

$$\tau_t = 120 \text{ кгс/мм}^2$$

Расчет контейнера

Коэффициент толстостенности контейнера:

$$K = \frac{d}{D} = \frac{25}{80} = 0,312$$

$$K^2 = 0,09$$

Постоянный коэффициент:

$$a = \sqrt[n]{\frac{1}{K}} = \sqrt{\frac{1}{0,312}} = \sqrt{3,2} = 1,79$$

Допускаемое напряжение:

$$[\tau] = \frac{\sigma_T}{K_\delta} = \frac{120}{1,2} = 100 \text{ кгс/мм}^2, \quad (6)$$

где  $K_\delta$  – коэффициент запаса прочности ( $K_\delta = 1,2$ )

Допускаемое внутреннее давление контейнера:

$$P_\delta = [\sigma](1 - K^2) \sqrt{\frac{1}{1 + K^2}} = 100(1 - 0,3^2) \sqrt{\frac{1}{1 + 0,09}} = 81 \text{ кгс/мм}^2$$

Таким образом, данный контейнер при работе в области упругих деформаций может выдержать внутреннее давление 810 МПа.

Шток с уплотнением запирает жидкость или материал в контейнере. Шток изготавливается в виде ступенчатого стержня. Направляющий участок  $A$ , длина которого равна диаметру контейнера, входит в контейнер по скользящей посадке  $H7/h6$ . На участке  $B$  диаметр штока выполняется на  $0,5 \div 1,0$  мм меньше. Уплотнительные кольца устанавливаются в нижней части штока и закрепляются с помощью стопорного кольца или гайки, которые предотвращают снятие уплотнительного кольца при выходе штока из контейнера.

Шток рассчитывается как стержень круглого сечения, неподвижно закрепленный верхним и нижним концами и нагруженный осевой сжимающей силой. Методика расчета на устойчивость заключается в определении  $P_{кр}$  и соблюдении условия:

$$P_{кр} = \frac{4\pi^2 EI}{\mu l^2}; \quad (7)$$

$$\sigma < \sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{F}; \quad (8)$$

$$I_z = I_y = \frac{\pi R^4}{4} \quad (9)$$

где  $E$  – модуль упругости материала штока;

$P_{кр}$  – критическая нагрузка;

$I$  – момент инерции;

$\mu$  – приведенный коэффициент длины.

Штоки изготавливаются из стали ХВГ, Х12М, ШХ15 и закаливаются до твердости 58÷63 HRC. Конструкция штока приведена в рабочей документации установки.

Техника безопасности при работе на установке УОП

При монтаже, пуске, эксплуатации и обслуживании установки необходимо соблюдать меры безопасности, предусмотренные при работе гидравлических прессов и лабораторных устройств, в комплект которых входит гидростанция.

К работе на установке допускается персонал, предварительно ознакомленный с общими правилами техники безопасности.

После полного окончания сборочно-монтажных работ необходимо заземлить установку в соответствии с требованиями правил технической эксплуатации электроустановок. Узел заземления находится на одной из колонн установки. Затем можно подключать установку к источнику электроэнергии.

Перед первым пуском необходимо освободить площадь вблизи установки от инструмента, приспособлений, обтирочных материалов, посторонних предметов, а также проверить соединения труб, креплений колонн, затяжку накидных гаек трубопроводов и предупредить обслуживающий персонал о пуске установки. Не разрешается производить запуск установки без необходимого количества масла в гидробаке, при неисправной контрольно-измерительной аппаратуре.

Эксплуатация установки производится при строгом соблюдении правил противопожарной безопасности. Это должно быть вентилируемое помещение, в котором обязательно присутствуют средства пожаротушения и аптечка с необходимыми медикаментами.

При обнаружении каких-либо отклонений от нормальной работы установки необходимо немедленно приостановить ее работу. Повторный запуск установки разрешается только после устранения всех выявленных неисправностей.

Перед демонтажем установки необходимо отключить ее от источника электроэнергии и принять меры по недопущению его случайного включения.

Не допускается:

- производить разборку гидросистемы под давлением;
- производить разборку маслопроводов, а также подтягивать крепежные накидные гайки и соединения гидросистемы под давлением;
- производить сварочные работы на подсоединенных трубопроводах, находящихся под давлением;
- категорически запрещается работать на установке без защитного кожуха на контейнере при нагружении его рабочим давлением.

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработана конструкция установки для определения прочности материалов произвольной формы на одноосное сжатие;
2. Приведен детальный расчет прочностных характеристик основных узлов УОП;
3. Разработанная установка в совокупности с запатентованным способом позволит оперативно контролировать изменения горно-геологической ситуации на любом горнодобывающем предприятии и контролировать качества сырья и готовой продукции в на предприятиях строительной отрасли.
4. Для внедрения разработки в производство необходимо пройти цикл приемочных испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 24941-81. Межгосударственный стандарт. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами. – М., 1981. – 15 с.
2. ГОСТ 21153.8-88. Государственный стандарт союза ССР. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. – М., 1988. – 15 с.
3. ГОСТ 21153.2-84. Межгосударственный стандарт. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М., 1984. – 8 с.
4. ГОСТ 21153.3-85. Государственный стандарт СССР. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – М., 1984. – 18 с.
5. ГОСТ 25.503-97. Межгосударственный стандарт. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. – М., 1997. – 27 с.
6. Стариков, Г. П. Определение прочности диспергированных горных пород / Г. П. Стариков, Т. Н. Мельник, Д. А. Нескреба // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Т. 30. – № 4. – С. 83-92.
7. Способ определения прочности угольного вещества: пат. 2790335 Рос. Федерация. – № 2021122960; заявл. 29.07.2021; опубл. 16.02.2023, Бюл. № 5 10 с.

Поступила в редколлегию 18.02.2023 г.