

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 24727

(13) С1

(45) 2025.11.05

(51) МПК

G 01N 3/32 (2006.01)

## (54) СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦА ГОРНОЙ ПОРОДЫ

(21) Номер заявки: а 20230182

(22) 2023.07.31

(43) 2025.03.05

(71) Заявитель: Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого" (ВУ)

(72) Авторы: Ткачев Виктор Михайлович; Бочаров Никита Валерьевич; Гутман Роман Евгеньевич; Митюрин Денис Георгиевич; Повжик Петр Петрович; Сердюков Дмитрий Вячеславович; Степанкин Игорь Николаевич; Халецкий Андрей Васильевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого" (ВУ)

(56) ВУ 23260 С1, 2020.

RU 2451282 С1, 2012.

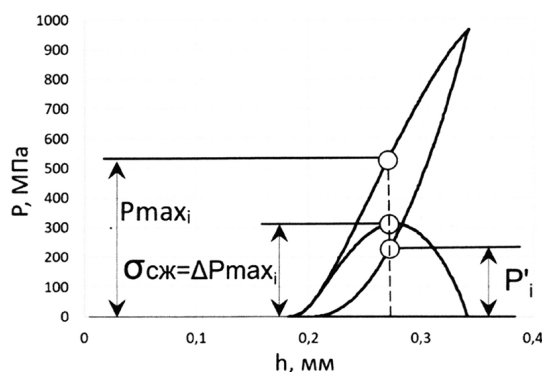
ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.

КОРШУНОВ В.А. и др. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами. Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2010, с. 41-45.

ОНИКА С.Г. и др. Комплексный метод построения паспорта прочности горной породы. Горная механика и машиностроение, 2017, № 2, с. 19-25.

(57)

Способ построения паспорта прочности образца горной породы, при котором в первом цикле вдавливают в образец индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого



Фиг. 1

## BY 24727 C1 2025.11.05

прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление  $P_i$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление  $P_i'$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних и тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением  $P_i$  на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением  $P_i'$  в период разгрузки, определяют максимальное значение разности указанных давлений  $\Delta P_{\max_i}$  для каждого цикла увеличения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей давлений  $\Delta P_{\max_i}$  от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответствующее горизонтальному участку графика, и принимают предел прочности на сжатие образца  $\sigma_{сж}$  равным этому значению, после чего вычисляют угол  $\varphi$  внутреннего трения по формуле:

$$\varphi = \arctg(\sigma_{сж}/P_{\max_i}),$$

где  $P_{\max_i}$  - давление на контактной поверхности в последнем цикле нагружения, соответствующее максимальной разнице между давлениями  $\Delta P_{\max_i}$  на этапе нагружения и этапе разгрузки; в декартовой системе координат, в которой по горизонтальной оси откладывают нормальные напряжения, а по вертикальной оси - касательные напряжения, строят прямую линию под углом  $\varphi$  к горизонтальной оси таким образом, чтобы она касалась окружности, проходящей через начало осей координат, при этом диаметр окружности равен величине предела прочности на сжатие образца  $\sigma_{сж}$ ; определяют координаты точки касания прямой линии и окружности и строят параболу, отражающую предел прочности образца, используя уравнение параболы, полученное из условия, что график параболы касается прямой линии и окружности и проходит через точку их соприкосновения:

$$\tau = \sqrt{2p(\sigma - \sigma_r)},$$

где  $\tau$  - касательные напряжения;

$p$  - коэффициент в уравнении параболы;

$\sigma$  - нормальные напряжения;

$\sigma_r$  - коэффициент, отражающий пересечение графика параболы с горизонтальной осью координат;

затем для определения коэффициентов уравнения параболы решают систему из двух уравнений, которая включает первую производную уравнения параболы и уравнение прямой линии касательной к параболе и окружности, отражающей предел прочности:

$$\begin{cases} k = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{2(\sigma - \sigma_r)}}, \\ \tau = k\sigma + c, \end{cases}$$

решая систему уравнений, находят значение коэффициентов  $p = k(c + k\sigma_0)$ ,

$\sigma_r = \sigma_0 - \frac{(c + k\sigma_0)}{2k}$ , где  $c$  - свободный член из уравнения прямой линии;  $\sigma_0$  - абсцисса точ-

ки касания прямой линии, параболы и окружности, отражающей величину предела прочности при одноосном сжатии.

---

Изобретение относится к физико-механическим испытаниям горных пород путем вдавливания индентора в поверхность образца и может быть использовано при инженерно-геологических изысканиях.

Известен расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении, по которому необходимо испытать не менее 6 образцов на одноосное сжатие и не менее 6 образцов на одноосное растяжение. Недостатком данного метода является необходимость доведения образцов до разрушения для определения предела прочности, что ограничивает применение метода ввиду ограниченности кернового материала для глубоких нефтяных и газовых скважин. Кроме того, влияние неоднородности структуры и анизотропии горной породы на коэффициент вариации результатов испытаний увеличивает неточность при определении прочностных характеристик [1].

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому является способ, при котором в процессе индентирования исследуемого образца в первом цикле вдавливают индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних и тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением в период разгрузки, определяют максимальное значение разности указанных давлений для каждого цикла увеличения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей давлений от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответствующее горизонтальному участку графика, принимают предел прочности на сжатие образца [2].

Недостатком данного способа является то, что в рамках описанных действий не определяется угол внутреннего трения, на основании значения которого возможно построение паспорта прочности горной породы.

Задача заявляемого способа заключается в расширении функциональных возможностей способа за счет построения паспорта прочности образца горной породы без его разрушения на основании определения величины угла внутреннего трения и предела прочности образца при одноосном сжатии.

Технический результат достигается тем, что в процессе индентирования исследуемого образца в первом цикле вдавливают индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального

го значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление  $P_i$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление  $P_i'$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних и тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением  $P_i$  на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением  $P_i'$  в период разгрузки, определяют максимальное значение разности указанных давлений  $\Delta P_{\max_i}$  для каждого цикла увеличения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей давлений  $\Delta P_{\max_i}$  от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответствующее горизонтальному участку графика, и принимают предел прочности на сжатие образца  $\sigma_{сж}$  равным этому значению, после чего вычисляют угол  $\varphi$  внутреннего трения по формуле:

$$\varphi = \arctg(\sigma_{сж} / P_{\max_i}), \quad (1)$$

где  $P_{\max_i}$  - давление на контактной поверхности в последнем цикле нагружения, соответствующее максимальной разнице между давлениями  $\Delta P_{\max_i}$  на этапе нагружения и этапе разгрузки; в декартовой системе координат, в которой по горизонтальной оси откладывают нормальные напряжения, а по вертикальной оси - касательные напряжения, строят прямую линию под углом  $\varphi$  по отношению к горизонтальной оси координат таким образом, чтобы она касалась окружности, проходящей через начало осей координат, при этом диаметр окружности равен величине предела прочности на сжатие образца  $\sigma_{сж}$ ; определяют координаты точки касания прямой линии и окружности и строят параболу [3], отражающую паспорт прочности образца, используя уравнение параболы, полученное из условия, что график параболы касается прямой линии и окружности и проходит через точку их соприкосновения:

$$\tau = \sqrt{2p(\sigma - \sigma_r)}, \quad (2)$$

где  $\tau$  - касательные напряжения;

$p$  - коэффициент в уравнении параболы;

$\sigma$  - нормальные напряжения;

$\sigma_r$  - коэффициент, отражающий пересечение графика параболы с горизонтальной осью координат;

затем для определения коэффициентов уравнения параболы решают систему из двух уравнений, которая включает первую производную уравнения параболы и уравнение прямой линии касательной к параболе и окружности, отражающей предел прочности:

$$\begin{cases} k = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{2(\sigma - \sigma_r)}}, \\ \tau = k\sigma + c, \end{cases} \quad (3)$$

решая систему уравнений, находят значения коэффициентов:

$$p = k(c + k\sigma_0); \quad (4)$$

$$\sigma_r = \sigma_0 - \frac{(c + k\sigma_0)}{2k}, \quad (5)$$

где  $c$  - свободный член из уравнения прямой линии;

$\sigma_0$  - абсцисса точки касания прямой, параболы и окружности, отражающей величину предела прочности при одноосном сжатии.

Благодаря возможности определения угла внутреннего трения не разрушая образец, используя индентирование, решается задача многократного испытания одного и того же образца горной породы с построением паспорта прочности по результатам каждого испытания. Проведение многократных испытаний одного и того же образца позволяет получить для каждого из определяемых параметров выборку данных, удовлетворяющую требованиям статистики.

Сущность изобретения поясняется фигурами. Фиг. 1 - график, отражающий изменение давления  $P_i$  на контактной поверхности между индентором и образцом в момент увеличения нагрузки и давления  $P_i'$  в момент разгрузки индентора, а также изменение разности  $\Delta P_{\max_i}$  между указанными давлениями на контактной поверхности в зависимости от перемещения индентора. Фиг. 2 - паспорт прочности образца горной породы, построенный на основании определения предела прочности при сжатии и угла внутреннего трения. Фиг. 3 - результаты определения предела прочности горной породы.

Способ осуществляют следующим образом. В процессе индентирования исследуемого образца в первом цикле вдавливают индентор переменного сечения непрерывно возрастающей нагрузкой до установленного максимального значения, после достижения которого прекращают вдавливание и производят разгрузку образца до нулевого значения нагрузки; не изменяя положения индентора, повторяют циклы вдавливания и разгрузки образца, обеспечивая в каждом последующем цикле дискретное увеличение максимального значения нагрузки, после достижения которого производят разгрузку образца, при этом строят зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора для каждого цикла увеличения нагрузки до максимального значения и разгрузки; для каждого цикла вдавливания рассчитывают давление  $P_i$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности; для каждого цикла разгрузки рассчитывают давление  $P_i'$  на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на максимальную площадь контактной поверхности; в каждом цикле для одних и тех же глубин перемещения индентора рассчитывают разности между давлением  $P_i$  на контактной поверхности в период увеличения нагрузки и давлением  $P_i'$  в период разгрузки, определяют максимальное значение разности  $\Delta P_{\max_i}$  указанных давлений для каждого цикла уве-

личения нагрузки и разгрузки образца; строят графическую зависимость полученных максимальных значений разностей  $\Delta P_{\max_i}$  давлений от максимальных значений нагрузок в циклах; на построенной графической зависимости определяют значение максимальной разности давлений, соответствующее горизонтальному участку графика, принимают предел прочности  $\sigma_{сж}$  на сжатие образца равным этому значению. Для расчета величины угла внутреннего трения исходят из того, что прикладываемое к индентору усилие  $F$  в процессе упругопластического деформирования затрачивается на упругую реакцию породы под индентором  $F_p$  и преодоление сил внутреннего трения  $F_f = Ftg\varphi$ , т. е.  $F = F_p + Ftg\varphi$  [4]:

$$Ftg\varphi = F - F_p. \quad (6)$$

Разделив обе части данного выражения на площадь контактной поверхности, получим:

$$P_i \operatorname{tg} \varphi = P_i - P_i', \quad (7)$$

или

$$P_i \operatorname{tg} \varphi = \Delta P, \quad (8)$$

где  $\Delta P$  является разностью между давлением  $P_i$  на контактную поверхность в момент увеличения нагрузки и давлением в момент разгрузки, т. е. упругой отдачи  $P_i'$  [2].

Таким образом, расчетное соотношение для определения угла внутреннего трения имеет вид:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\Delta P_{\max_i}}{P_{\max_i}} \right). \quad (9)$$

С учетом того, что  $\Delta P_{\max_i} = \sigma_{\text{сж}}$  [2], выражение (9) примет вид (1).

Для построения паспорта прочности на основании знания величин предела прочности и угла внутреннего трения используют декартову систему координат, в которой по горизонтальной оси откладывают нормальные напряжения, а по вертикальной оси - касательные напряжения. В указанной системе координат строят окружность, проходящую через начало координат, диаметр которой равен значению величины предела прочности, точка 1 (фиг. 2), а центр лежит на горизонтальной оси в области положительных значений, точка 2 (фиг. 2). Также строят прямую линию таким образом, чтобы она располагалась под углом  $\varphi$  по отношению к горизонтальной оси координат и при этом касалась окружности. Точка касания 3 (фиг. 2) лежит в области положительных значений обеих координат. Определяют координаты точки 3 (фиг. 2) касания прямой линии и окружности. Находят уравнение параболы из условия, что ее график должен проходить через точку соприкосновения прямой линии и окружности и касаться их в указанной точке. Используют уравнение параболы в виде (2).

Для определения коэффициентов уравнения (2) решают систему из двух уравнений (3), которая включает первую производную уравнения параболы и уравнение прямой линии касательной к параболе и окружности, отражающей предел прочности.

Решение системы уравнений (3) в общем виде позволяет найти значения коэффициентов (4) и (5).

### **Пример.**

Исследовали материал керна горной породы, извлеченной из скважины № X Мармовичского месторождения (Республика Беларусь). Содержание доломита в отобранном образце по результатам рентгеноструктурного анализа составляет не менее 96 %. Испытания проводят на цилиндрических образцах диаметром 30 мм и высотой 60 мм, что соответствует ГОСТ 21153.3-85. Образец устанавливают на испытательный стол станда "INSTRON". В качестве индентора используют пирамиду Виккерса, изготовленную из твердого сплава ВК-6, которую с помощью специальной оправки закрепляют на траверсе станда "INSTRON". Затем вдавливают индентор в поверхность образца с непрерывным увеличением нагрузки до максимального значения  $F_{\max 1} = 100$  Н, после чего вдавливание прекращают и осуществляют разгрузку индентора до нулевого значения. Регистрируют изменение нагрузки  $F_1$  в зависимости от перемещения  $h_1$  индентора.

Повторное и следующие за ним вдавливания индентора проводят не изменяя взаимного расположения образца и индентора, увеличивая максимальную нагрузку  $F_{\max_i}$  на 100 Н в каждом последующем цикле вдавливания индентора. Величина максимальной нагрузки в рассматриваемом примере возрастала в следующей последовательности: 100 Н, 200 Н, 300 Н, 400 Н, 500 Н, 600 Н, 700 Н, 800 Н... 3000 Н. Было проведено 30 циклов нагружения - разгрузки. Для каждого цикла вдавливания проводят расчет величины давления  $P_i$  на

контактной поверхности между индентором и образцом путем деления нагрузки, приложенной к индентору, на площадь контакта между индентором и поверхностью исследуемого образца. Величину давления  $P_i$  на контактной поверхности в момент непрерывного увеличения нагрузки рассчитывают с учетом непрерывного увеличения площади  $S_i$  контактной поверхности, которую рассчитывают исходя из глубины внедрения  $h_i$  индентора, а также исходя из его геометрической формы, представляющей собой четырехгранную пирамиду с углом при вершине  $136^\circ$ . Для алмазного индентора Виккерса площадь контактной поверхности между индентором и испытуемым материалом рассчитывают по формуле  $S_i = 4h_i^2 \sin 68^\circ / \cos^2 68^\circ$  или  $S_i = 26,428 \times h_i^2$ . Величину давления  $P_i'$  на контактной поверхности в момент разгрузки рассчитывают путем деления текущей величины нагрузки на площадь контактной поверхности  $S_{\max_i}$ , соответствующую максимальному перемещению  $h_{\max_i}$  индентора, в каждом цикле испытания. То есть в расчете величины давления  $P_i'$  на контактной поверхности в момент разгрузки используют постоянную величину площади контактной поверхности  $S_{\max_i}$ , рассчитанную для данного цикла углубления. Для каждого цикла вдавливания индентора рассчитывают разницу между давлением в момент увеличения усилия  $P_i$  и его уменьшением  $P_i'$  по формуле  $\Delta P_i = P_i - P_i'$ . Строят графические зависимости изменения  $P_i$ ,  $P_i'$  и  $\Delta P_i$  от перемещения  $h_i$  индентора. На графике зависимости  $\Delta P_i$  от  $h_i$  определяют максимальное значение  $\Delta P_{\max_i}$  (фиг. 1) для каждого цикла испытаний.

Строят графическую зависимость между величинами максимальных разностей давлений  $\Delta P_{\max_i}$  и максимальными значениями нагрузки  $F_{\max_i}$  для всех циклов испытаний (фиг. 3). На указанном графике горизонтальные участки, отражающие постоянные величины  $\Delta P_{\max_i}$ , соответствуют следующим значениям предела прочности на сжатие испытуемого материала: 306 МПа, 302 МПа, 339 МПа, 369 МПа и 303 МПа. Для каждого из значений определяют величину  $P_{\max_i}$  согласно фиг. 1. Получают ряд значений: 576 МПа, 586 МПа, 608 МПа, 688 МПа и 577 МПа. Затем рассчитывают значения угла внутреннего трения по формуле (4). Получают ряд значений: 28,0; 27,2; 29,1; 28,2 и 27,7 градуса (таблица). Затем для всех определенных значений угла внутреннего трения и предела прочности при сжатии строят паспорта прочности. Для этого в декартовой системе координат строят окружность, проходящую через начало координат; диаметр окружности равен величине рассчитанного предела прочности при сжатии, точка 1 (фиг. 2), а центр окружности располагается на горизонтальной оси координат в области положительных значений, точка 2 (фиг. 2). Строят прямую линию под углом  $\varphi$  к горизонтальной оси координат таким образом, чтобы она касалась окружности в точке 3 (фиг. 2), расположенной в области положительных значений для обеих осей координат. После этого вычисляют координаты точки касания 3 (фиг. 2) по формулам:

$$x_2 = \frac{\sigma_{сж}}{2}(1 - \sin\varphi); \quad (10)$$

$$y_2 = \frac{\sigma_{сж}}{2} \cos\varphi. \quad (11)$$

Для первого паспорта прочности, который строится на основании величин  $\sigma_{сж} = 306$  МПа и  $\varphi = 28,0$  градуса, получают следующие координаты точки касания прямой линии и окружности:  $x_2 = 79,8$  МПа,  $y_2 = 132,9$  МПа. Зная коэффициент наклона прямой линии к горизонтальной оси координат  $k = \operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}28^\circ = 0,53$ , подставляют найденные значения во второе уравнение системы уравнений (3) и находят свободный член уравнения прямой линии, точка 5 (фиг. 2),  $c = 90,4$  МПа. Подставляют значения  $c = 90,4$  МПа и  $k = 0,53$  в

# ВУ 24727 С1 2025.11.05

уравнения (4) и (5). Также подставляют величину  $x_2 = 79,8$  МПа в эти же уравнения и рассчитывают значения коэффициентов параболы:  $p = 70,7$  и  $\sigma_r = -42,6$ . По полученным коэффициентам составляют уравнение параболы:

$$\tau = \sqrt{2 \cdot 70,7(\sigma + 42,6)}, \quad (12)$$

на основании которого строят паспорт прочности образца горной породы по результатам первого испытания. Учитывают, что крайняя левая точка 4 (фиг. 2) параболы - паспорта прочности будет иметь координату  $\sigma_r = -42,6$  МПа. Все остальные точки будут располагаться правее.

Аналогично описанному алгоритму производят расчеты и строят паспорта прочности для всех остальных испытаний. Как видно из таблицы, полученные значения предела прочности при сжатии, угла внутреннего трения для образца с содержанием более 96 % доломита не противоречат справочным данным, отражающим приведенные в специальной литературе значения свойств для горной породы доломит [5-8]. Дисперсия определяемых характеристик горных пород по предлагаемому способу существенно меньше, чем диапазон значений, приведенных в специальной литературе. Возможность определять минеральный состав в области образца горной породы, которая была испытана методом индентирования, позволяет выявлять взаимосвязь минерального состава горной породы с ее механическими характеристиками и уточнять справочные данные.

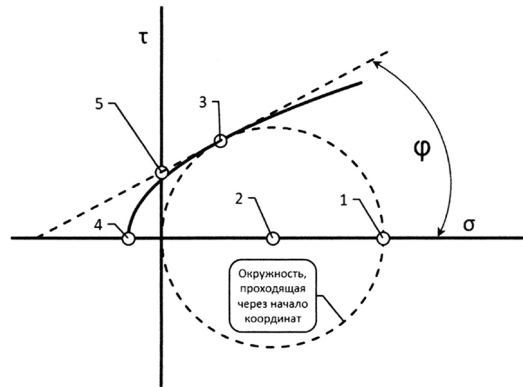
## Результаты определения параметров паспорта прочности для образца керна из скважины X Мармовичского месторождения

Категория	Результаты исследования образца с содержанием доломита не менее 96 %					Справочные данные [7-10]
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
№ испытания						
$\Delta P_{\max_i}$ , МПа (предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ )	306	302	339	369	303	14...450
$P_{\max_i}$ , МПа	576	586	608	688	577	-
Тангенс $\varphi$ , градус	0,53	0,51	0,56	0,54	0,52	-
Угол внутреннего трения, градус	28,0	27,2	29,1	28,2	27,7	24...38

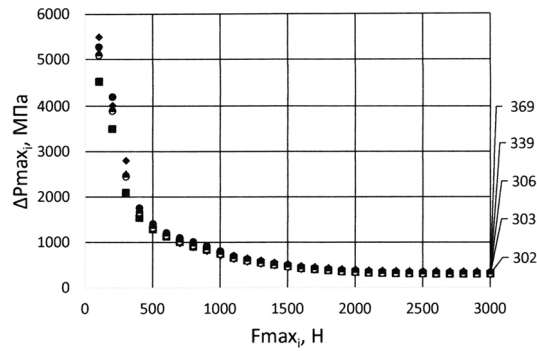
Источники информации:

1. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.
2. ВУ 23260 С1, 2020.
3. КАШНИКОВ Ю.А. и др. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. Москва: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2007, с. 74.
4. НЕСКРОМНЫХ В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. Учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2012, с. 53-54.
5. АБРАМСОН М.Г. и др. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. Москва: Недра, 1984, 207 с.
6. ПРОТОДЬЯКОНОВ М.М. и др. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород. Справочное пособие. Москва: Недра, 1981, 192 с.
7. Петрофизика. Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые. Под ред. Н.Б. Дортман. Москва: Недра, 1992, 391 с.

8. ЧИРКОВ С.Е. и др. Активизация процессов сдвижения горного массива при затоплении угольных шахт как следствие изменения свойств подработанных горных пород при водонасыщении. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2013, № 4, с. 81-87.



Фиг. 2



Фиг. 3