

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2521116

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" (РУ)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013103859

Приоритет изобретения 29 января 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 29 апреля 2014 г.

Срок действия патента истекает 29 января 2033 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2013103859/28, 29.01.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
29.01.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.01.2013

(45) Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2435955 C1 10.12.2011 . RU  
2447284 C2 10.04.2012 . SU 332223 A1  
14.03.1972 . CN 102183410 A 14.09.2011

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,  
ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-  
сырьевой университет "Горный", отдел ИС и  
ТТ

(72) Автор(ы):

Коршунов Владимир Алексеевич (RU),  
Петров Дмитрий Николаевич (RU),  
Шоков Анатолий Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

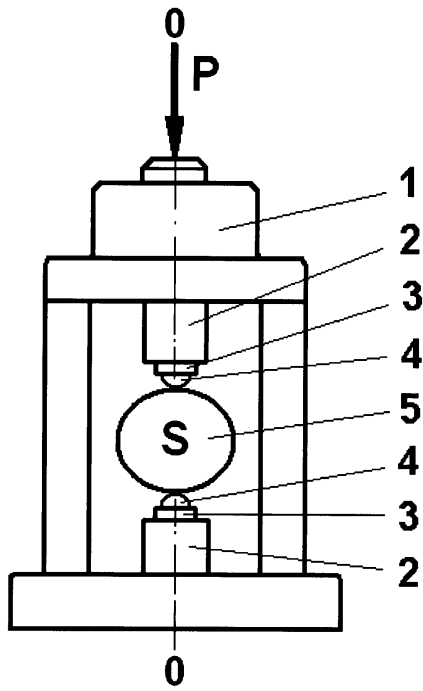
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Национальный минерально-сырьевой  
университет "Горный" (RU)

**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к механическим испытаниям горных пород и материалов, имеющих хрупкий характер разрушения, и может быть использовано при инженерно-геологических изысканиях. Сущность: осуществляют нагружение образца двумя встречно направленными сферическими инденторами до его раскалывания, фиксируют разрушающую силу, определяют в разрушенном образце площадь поверхности трещины отрыва, проходящую через ось нагружения, и геометрические параметры разрушенных зон в областях контакта с обоими сферическими инденторами, вычисляют растягивающее напряжение разрыва образца и среднее сжимающее напряжение на границе большей из разрушенных зон и определяют в

качестве механических свойств образца предел прочности и сопротивление срезу. Из обломков разрушенного образца собирают составной образец, на торцах которого определяют геометрические параметры разрушенных зон - диаметр остаточных отпечатков от инденторов и длину лунок выкола вдоль поверхности трещины отрыва. Определяют площадь поверхности большей разрушенной зоны на контакте с инденторами, предел прочности при всестороннем растяжении, максимальное сопротивление срезу и коэффициент Пуассона по формулам. Технический результат: упрощение испытаний, повышение точности определения механических свойств образцов и информативности испытаний. 5 табл., 2 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*E21C 39/00* (2006.01)  
*G01N 3/08* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013103859/28, 29.01.2013

(24) Effective date for property rights:  
29.01.2013

Priority:

(22) Date of filing: 29.01.2013

(45) Date of publication: 27.06.2014 Bull. № 18

Mail address:

199106, Sankt-Peterburg, V.O., 21 linija, 2, FGBOU  
VPO "Natsional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet  
"Gornyj", otdel IS i TT

(72) Inventor(s):

Korshunov Vladimir Alekseevich (RU),  
Petrov Dmitrij Nikolaevich (RU),  
Shokov Anatolij Nikolaevich (RU)

(73) Proprietor(s):

federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija "Natsional'nyj  
mineral'no-syr'evoj universitet "Gornyj" (RU)

(54) **DETERMINATION OF ROCK SPECIMEN MECHANICAL PROPERTIES**

(57) Abstract:

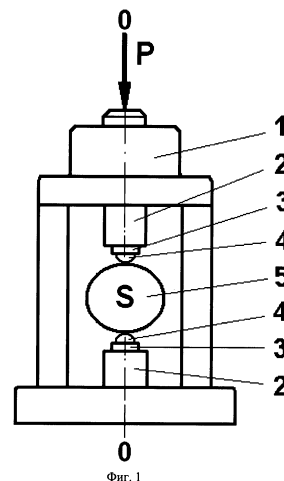
FIELD: mining.

SUBSTANCE: specimen is loaded by two spherical indenters directed in opposition till its cracking. Destructive force is registered to define cracking surface area in destructed specimen that extends through loading axis, geometrical parameters of destructed zones in areas of contact with spherical indenters, specimen rupture stretching stress and mean compressive stress at the boundary of the larger of destructed zones are calculated. Breaking point and shear resistance are defined as mechanical properties of the specimen. Debris of crushed specimen are used to compose a composite specimen for determination of geometrical parameters of crushed zones at the ends of said composite specimen. Diameter of residual marks of indenters and indent hole length along fracture surface are defined. Surface area of larger destructed zone at contact with indenters, breaking point at uniform stretching, maximum shear resistance and Poisson factor are defined by the formu-

las.

EFFECT: simplified tests, higher precision of determination of mechanical properties.

5 tbl, 2 dwg



Фиг. 1

Изобретение относится к механическим испытаниям горных пород и материалов, имеющих хрупкий характер разрушения, и может быть использовано при инженерно-геологических изысканиях.

5 Известен способ определения напряженного состояния горных пород в массиве (авторское свидетельство СССР №1259005, кл. E21C 39/00, 1986), включающий вдавливание в горную породу (забой скважины) нагрузочного элемента в виде штампа до разрушения породы с образованием лунок выкола и определение глубин вдавливания штампа, равных глубинам лунок выкола.

10 Недостатками способа являются низкая точность относительного определения напряженного состояния породы без учета абсолютных значений предельной объемной прочности и действующих напряжений, а также сложность и трудоемкость испытаний из-за поэтапного бурения скважины и многократного вдавливания штампа.

15 Известен способ определения контактной динамической прочности (авторское свидетельство СССР №1346785, кл. E21C 39/00, 1987), включающий ударное внедрение нагрузочного элемента (наконечника мерного стержня) в породу, определение напряжений в нагрузочном элементе и геометрических параметров лунки разрушения (глубины лунки разрушения и ее диаметра).

20 Недостатками способа являются сложность испытательного и регистрирующего оборудования для определения максимальных напряжений в нагрузочном элементе и трудоемкость проведения испытаний, связанных с неоднократным ударным воздействием нагрузочного элемента и необходимостью его очистки от продуктов разрушения.

25 Известен способ определения коэффициента внутреннего трения горных пород (авторское свидетельство СССР №970197, кл. G01N 19/02, 1982), включающий приложение к образцу сферической формы раскалывающего усилия и определение в плоскости, проходящей через ось нагружения, геометрических параметров (радиуса основания и высоты) зон разрушенной породы на контакте с нагрузочными поверхностями.

30 Недостатками способа являются трудоемкость подготовки к испытаниям, связанная с изготовлением образца специальной сферической формы и низкая точность определения показателя прочности из-за сложности измерения размеров зон разрушенной породы в плоскости, проходящей через ось нагружения на неровных поверхностях обломков раздавленного образца.

35 Известен способ определения прочностных характеристик горных пород (авторское свидетельство СССР №473930, кл. G01N 3/12, E21C 39/00, 1975), включающий внедрение нагрузочного элемента (пуансона) в образец породы до разрушения с образованием сквозного отверстия и лунки выкола на противоположной свободной поверхности образца и определение геометрических параметров лунки выкола (диаметра и глубины лунки).

40 Недостатками способа являются низкая точность определения предельных прочностных характеристик с использованием обобщенных интегральных показателей по корреляционным зависимостям и трудоемкость испытаний из-за необходимости дополнительного определения одной из характеристик прочности (пределов прочности при растяжении, сжатии или сдвиге).

45 Известен способ определения механических свойств образцов горных пород (статья: Коршунов В.А. Определение показателей объемной прочности образцов горных пород при их нагружении сферическими инденторами. Горная геомеханика и маркшейдерское дело: Сборник научных трудов. - СПб.: ВНИМИ, 1999. - М-во топлива и энергетики

РФ, РАН, - с.70-75), принимаемый за прототип и заключающийся в том, что образец нагружают двумя встречно направленными сферическими инденторами до его раскалывания, фиксируют разрушающую силу, определяют в разрушенном образце площадь поверхности трещины отрыва, проходящей через ось нагружения, и  
 5 геометрические параметры разрушенных зон в областях контакта с обоими сферическими инденторами (глубину и максимальную ширину зон на поверхности трещины отрыва), вычисляют растягивающее напряжение разрыва образца и среднее сжимающее напряжение на границе большей из разрушенных зон и определяют в качестве механических свойств образца предел прочности (предел прочности при  
 10 одноосном сжатии) и сопротивление срезу (предельное сопротивление срезу - сцепление).

Недостатком этого способа является трудоемкость и низкая точность определения механических свойств из-за значительной сложности и недостаточной точности определения геометрических параметров разрушенных зон на поверхности трещины отрыва расколотого образца, которая имеет, как правило, неудобную для измерений  
 15 сложную рельефную форму. Другой недостаток способа заключается в его невысокой информативности. Возможности способа ограничены определением прочностных свойств в области «паспорта прочности», прилегающей к состоянию «чистого сдвига» и соответствующей разрушению от отрыва при действии растягивающих и сжимающих напряжений и разрушению сдвигом при действии неравномерных сжимающих  
 20 невысокого уровня напряжений.

Технический результат изобретения заключается в упрощении испытаний и повышении точности определения механических свойств образцов за счет упрощения определения геометрических параметров разрушенных зон на торцах образцов в  
 25 областях контакта с инденторами и повышении информативности испытаний за счет дополнительного определения прочностных характеристик «паспорта прочности» в областях растягивающих и сжимающих с высоким уровнем напряжений (предела прочности при всестороннем растяжении и максимального сопротивления срезу), а также коэффициента Пуассона.

Технический результат достигается тем, что в способе определения механических  
 30 свойств образцов горных пород и материалов, включающем нагружение образца двумя встречно направленными сферическими инденторами до его раскалывания, фиксирование разрушающей силы, определение в разрушенном образце площади поверхности трещины отрыва, проходящей через ось нагружения, и геометрических параметров разрушенных зон в областях контакта с обоими сферическими инденторами,  
 35 вычисление растягивающего напряжения разрыва образца и среднего сжимающего напряжения на границе большей из разрушенных зон и определение в качестве механических свойств образца предела прочности и сопротивления срезу, согласно изобретению, из обломков разрушенного образца собирают составной образец, на торцах которого определяют геометрические параметры разрушенных зон - диаметр  
 40 остаточных отпечатков от инденторов и длину лунок выкола вдоль поверхности трещины отрыва, определяют площадь поверхности большей разрушенной зоны на контакте с инденторами по формуле:

$$F = \pi \cdot D_{\text{отп}} \cdot L_{\text{л}},$$

где F - площадь поверхности большей разрушенной зоны;

45  $D_{\text{отп}}$  - диаметр остаточного отпечатка от индентора;

$L_{\text{л}}$  - длина лунки выкола вдоль поверхности трещины отрыва;

$$\pi = 3,14,$$

а в качестве механических свойств образца определяют предел прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{вр}^к$ , максимальное сопротивление срезам  $\tau_{max}^к$  и коэффициент Пуассона  $\mu_{\sigma}$  по формулам:

$$5 \quad \sigma_{вр}^к = 2 \cdot \sigma_t ;$$

$$\tau_{max}^к = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{p \cdot \sigma_t} + \frac{p}{\sigma_t} \cdot \frac{(p - 3 \cdot \sigma_t)}{4} ;$$

$$10 \quad \mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_t}{p} \cdot \frac{(2 + \sqrt{p / \sigma_t})}{(1 + \sqrt{p / \sigma_t})} ;$$

где  $\sigma_t$  - растягивающее напряжение разрыва образца;

p - среднее сжимающее напряжение на границе большей из разрушенных зон.

15 Способ поясняется фиг.1, на которой представлена схема нагрузочного устройства для реализации способа, и фиг.2, на которой представлена схема определения в составном разрушенном образце геометрических параметров разрушенной зоны в области контакта со сферическим индентором, где 1 - корпус устройства, 2 - штоки, 3 - вкладыши, 4 - сферические инденторы, 5 - образец, 6 - трещина отрыва, 7 и 8 - обломки разрушенного образца, 9 - лунка выкола, 10 - остаточный отпечаток от индентора.

20 Нагрузочное устройство должно обеспечивать приложение к образцу сжимающей силы двумя соосными встречно направленными сферическими инденторами. Корпус 1 устройства представляет собой жесткую раму, внутри которой на оси нагружения 00 размещается подвижная пара штоков 2 с вкладышами 3, содержащими стальные сферические инденторы 4 для передачи нагрузки на образец 5.

25 Способ осуществляют следующим образом.

Образец устанавливают между сферическими инденторами и равномерно нагружают с регистрацией сжимающей силы P. Допускается испытание образцов произвольной, в том числе неправильной, формы с необработанными поверхностями.

30 С ростом нагрузки в образце в областях контакта со сферическими инденторами развиваются разрушенные зоны раздробленного, уплотняемого при сжатии материала. Зоны имеют форму усеченных эллипсоидов. Более интенсивно развивается зона в слабой по прочности области образца. При достижении предельного напряженного состояния на границе большей из разрушенных зон возникает трещина отрыва 6, которая, смыкаясь со второй зоной, раскалывает образец на обломки 7 и 8.

35 Фиксируют максимальную (разрушающую) силу P. После этого в обломках образца измеряют (например, штангенциркулем) характерные линейные размеры поверхности трещины отрыва, по которым вычисляют ее площадь S.

40 Затем из обломков образца собирают составной образец. Для этого обломки прикладывают друг к другу, обеспечивая плотный контакт вдоль трещины отрыва. В составном образце определяют геометрические параметры разрушенных зон - диаметр остаточных отпечатков от инденторов  $D_{отп}$  и длину лунок выкола вдоль поверхности трещины отрыва  $L_{л}$ . При этом границы лунки выкола выделяют по большому раскрытию берегов трещины в пределах выкола, а диаметр остаточного отпечатка 45 предпочтительнее измерять в направлении, перпендикулярном трещине отрыва. Для упрощения и повышения точности измерений геометрические параметры разрушенных зон рекомендуется определять путем фотографирования образца совместно с измерительной линейкой и последующей обработки увеличенного на мониторе

компьютера изображения.

Вычисляют площадь поверхностей разрушенных зон на контакте с обоими инденторами  $F_1$  и  $F_2$  как поверхностей тела в форме эллипсоида, по формуле:

$$F = \pi \cdot D_{\text{отп}} \cdot L_{\text{д}}.$$

Выбирают большее из двух значений  $F_1$  и  $F_2$ .

Рассчитывают растягивающее напряжение разрыва образца  $\sigma_t$  и среднее сжимающее напряжение  $p$  на границе большей из разрушенных зон по формулам:

$$\sigma_t = \frac{P}{S};$$

$$p = \frac{P}{F}.$$

Определяют предел прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{\text{вр}}^{\text{к}}$ , максимальное сопротивление срезу  $\tau_{\text{max}}^{\text{к}}$  и коэффициент Пуассона  $\mu_{\sigma}$  по формулам:

$$\sigma_{\text{вр}}^{\text{к}} = 2 \cdot \sigma_t;$$

$$\tau_{\text{max}}^{\text{к}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{p \cdot \sigma_t} + \frac{p}{\sigma_t} \cdot \frac{(p - 3 \cdot \sigma_t)}{4};$$

$$\mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_t}{p} \cdot \frac{(2 + \sqrt{p/\sigma_t})}{(1 + \sqrt{p/\sigma_t})}$$

Экспериментальным обоснованием определения площади поверхности разрушенной зоны на контакте с индентором служат результаты сопоставления значений площади поверхности разрушенной зоны, определенной предлагаемым способом и в соответствии со способом-прототипом (через значения максимальной ширины  $D$  и глубины  $h$  зоны на поверхности трещины отрыва по формуле:  $F = \pi \cdot D \cdot h$ ) для различных горных пород и хрупких материалов.

Установлено подобие формы и размеров зоны разрушения на поверхности трещины отрыва и на торце образца на контакте с индентором в расколотом образце. При этом геометрические параметры разрушенной зоны на торце образца (длина лунки выкола вдоль поверхности трещины отрыва  $L_{\text{д}}$  и диаметр остаточного отпечатка от индентора  $D_{\text{отп}}$ ) весьма незначительно отличаются по величине от аналогичных параметров зоны на поверхности трещины отрыва (максимальной ширины  $D$  и глубины  $h$  зоны, соответственно).

В таблице 1 представлены примеры определения сравниваемыми способами геометрических параметров разрушенных зон и значений площади их поверхностей в образцах 22 проб горных пород и хрупких материалов. Отклонение результатов определений сравниваемыми способами колебалось в пределах от -8 до 11%, составило, в среднем, 6% и было связано со сложностью измерения нечетких границ зон на рельефных поверхностях трещины разрыва в расколотых образцах при использовании способа-прототипа. Определение предлагаемым способом параметров разрушенных зон на более ровной внешней поверхности образца существенно упрощает измерения и, соответственно, повышает точность определений. Положительный эффект еще более значителен в случае вдавливания инденторов в предварительно подготовленную поверхность (в отшлифованную плоскую поверхность образцов-дисков или боковую



поверхность обломков кернов).

Теоретическим обоснованием определения величины предела прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{вр}^к$  служат результаты анализа с использованием построения

5

паспорта прочности горных пород (оггибающей предельных кругов Мора) в области действия растягивающих напряжений.

Известно, что в момент раскола образца на поверхности трещины отрыва на границе разрушенной зоны действуют касательные напряжения, равные величине предельного

10

сопротивления срезу (сцепления)  $\tau_0 = \sqrt{\sigma_t \cdot p}$  (статья: Коршунов В.А. Определение показателей объемной прочности образцов горных пород при их нагружении сферическими инденторами. Горная геомеханика и маркшейдерское дело: Сборник научных трудов. - СПб.: ВНИМИ, 1999. - М-во топлива и энергетики РФ, РАН. - с.70-

15

75). Известно также, что этому предельному напряженному состоянию на «паспорте прочности» соответствует перелом оггибающей кривой на два качественно различных участка. При этом оггибающая предельных кругов Мора в области разрушения от

20

отрыва при совместном действии растягивающих и сжимающих напряжений может быть приближенно принята прямолинейной, что не противоречит опытным данным по испытанию хрупких материалов (монография: Евдокимов П.Д., Салегин Д.Д. Прочность, сопротивляемость сдвигу и деформируемость оснований сооружений на скальных породах. Изд-во «Энергия», М. - Л., 1964, 174 с.). При нагружении образца сферическими инденторами этот прямолинейный участок «паспорта прочности»,

25

соответствующий величине предельного сопротивления срезу (сцепления)  $\tau_0 = \sqrt{\sigma_t \cdot p}$ , будет характеризоваться наклоном на «паспорте прочности», равным углу внутреннего

30

трения  $\varphi_0 = \arctg\left(\frac{p - \sigma_t}{2 \cdot \sqrt{p \cdot \sigma_t}}\right)$ . Тогда величина максимально возможного (по абсолютной величине) растягивающего напряжения, соответствующего пределу прочности на отрыв, может быть вычислена как максимальный диаметр предельного

35

круга растягивающих напряжений Мора - круга Мора с центром в точке  $-\sigma_t$  на оси нормальных напряжений и радиусом, равным  $\sigma_t$ . Таким образом, определяемая согласно предлагаемому способу величина прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{вр}^к$ , равная  $2 \cdot \sigma_t$ , по своему физическому смыслу соответствует максимальной возможной абсолютной

40

величине прочности на разрыв хрупкого тела, обусловленной величиной главного растягивающего напряжения для конкретных условий нагружения образца сферическими инденторами.

Экспериментальным обоснованием определения величины предела прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{вр}^к$  служат результаты сопоставления значений предела прочности  $\sigma_{вр}^к$  и  $\sigma_0$ , определенных предлагаемым способом и стандартным расчетным методом построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении (ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. Приложение 2 обязательное. Методы построения паспорта прочности»). При этом в качестве исходных данных для расчетного метода были использованы значения предела прочности при одноосном сжатии, определенные в соответствии со способом-прототипом, и предела прочности

45

при растяжении, вычисленные с использованием способа по патенту РФ №2435955, кл. E21C 39/00, G01N 3/08, 2011:

$$\sigma_c = p + \sqrt{p \cdot \sigma_t} ;$$

$$5 \quad \sigma_p^k = 2 \cdot \frac{\sigma_t \cdot p}{\sigma_t + p} .$$

В таблице 2 представлены безразмерные значения прочности  $\sigma_{вр}^k$  и  $\sigma_o$  (в долях от  $\sigma_t$ ) для горных пород или хрупких материалов, характеризуемых показателем хрупкости

10  $K_{хр}$  (отношением пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении  $\sigma_c/\sigma_p$ ) в широком диапазоне от 5 до 20, соответствующем реальным горным породам. Отклонение результатов определений сравниваемыми способами уменьшалось от 9 до 3% с увеличением показателя хрупкости и, в среднем, составило 5%, что соизмеримо с

15 точностью методов. Теоретическим обоснованием определения величины максимального сопротивления срезу  $\tau_{max}^k$  предложенным способом служит экспериментально установленная связь минимального главного нормального напряжения  $\sigma_3^M$ , соответствующего достижению

20 максимального сопротивления срезу  $\tau_{max}^k$ , с величинами предельного сопротивления срезу (сцепления)  $\tau_0$  и параметрами предельного напряжения состояния, соответствующего минимальному главному нормальному напряжению, равному пределу прочности при одноосном сжатии  $\sigma_c$ .

25 Если принять огибающую предельных кругов Мора в области разрушения сдвигом при действии неравномерных сжимающих невысокого уровня напряжений прямолинейной, что не противоречит опытным данным по испытанию хрупких горных пород и материалов, то установленная связь может быть выражена следующим образом:

$$30 \quad \sigma_3^M = \frac{\sigma_1 - \sigma_c}{2} - 2 \cdot \tau_0 ,$$

где  $(\sigma_1 - \sigma_c)/2$  - радиус предельного круга Мора, соответствующего минимальному главному нормальному напряжению, равному  $\sigma_c$ .

35 После алгебраических преобразований  $\sigma_3^M$  было выражено через величины  $\sigma_c$  и  $\sigma_{вр}^k$  и отношение  $p/\sigma_t$  компонент предельного напряженного состояния на границе разрушенной зоны, соответствующего расколу образца:

$$\sigma_3^M = \sqrt{p/\sigma_t} \cdot \left( \frac{\sigma_c}{2} - \sigma_{вр}^k \right) .$$

40 Величина  $\tau_{max}^k$  вычислялась путем решения системы двух уравнений. Одним из которых является линейное уравнение  $\tau = C + t\varphi \cdot \sigma_n$ , описывающее прямолинейный участок «паспорта прочности» в области всестороннего неравномерного сжатия, характеризуемой величинами условного сцепления  $C$  и соответствующего угла

45 внутреннего трения  $\varphi$ . При этом  $C = \frac{4\sqrt{\sigma_t \cdot p} \cdot (\sqrt{\sigma_t} + \sqrt{p})}{2}$  и  $\text{tg}\varphi = \frac{\sqrt{p} - \sqrt{\sigma_t}}{2 \cdot 4\sqrt{\sigma_t \cdot p}}$ .

Вторым уравнением служило выражение для предельного круга Мора, пересекающего

ось абсцисс «паспорта прочности» в точке  $\sigma_3^M$  и касающегося предельной огибающей.

После алгебраических преобразований выражение относительно  $\tau_{\max}^k$  приняло вид:

$$\tau_{\max}^k = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{p \cdot \sigma_t} + \frac{p}{\sigma_t} \cdot \frac{(p - 3 \cdot \sigma_t)}{4}$$

Экспериментальным обоснованием определения максимального сопротивления срезам  $\tau_{\max}^k$  служат результаты сопоставления значений  $\tau_{\max}$ , определенных предлагаемым способом и стандартным расчетным методом построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении (ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. Приложение 2 обязательное. Методы построения паспорта прочности»). При этом в качестве исходных данных для расчетного метода были использованы значения пределов прочности  $\sigma_c$  и  $\sigma_p$ , определенные в соответствии со способом-прототипом и с использованием способа по патенту РФ №2435955, кл. E21C 39/00, G01N 3/08, 2011.

В таблице 3 представлены безразмерные значения максимального сопротивления срезам  $\tau_{\max}$  (в долях от  $\sigma_t$ ) для горных пород или хрупких материалов, характеризующихся показателем хрупкости  $K_{xp}$  (отношением  $\sigma_c/\sigma_p$ ) в диапазоне от 5 до 20. Отклонение результатов определений колебалось в диапазоне от -6 до +6% с увеличением показателя хрупкости и составило, в среднем, менее 3,5%, что соизмеримо с точностью методов.

Теоретическим обоснованием определения коэффициента Пуассона  $\mu_\sigma$  служит установленное экспериментально геомеханическое подобие коэффициента Пуассона и отношения диапазонов предельных напряжений на «паспорте прочности горной породы», соответствующих разрушению путем разрыва и сдвигом. Диапазон разрушения путем разрыва на паспорте прочности складывается из диапазона растягивающих минимальных главных нормальных напряжений, равного пределу прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{вр}^k$ , и диапазона сжимающих минимальных главных нормальных напряжений, равного предельному сопротивлению срезам (сцеплению)  $\tau_0$ . Диапазону разрушения путем сдвига на паспорте прочности соответствует диапазон максимальных касательных напряжений с минимальными главными нормальными напряжениями от предельного сопротивления срезам  $\tau_0$  до предела прочности при одноосном сжатии  $\sigma_c$ .

После алгебраических преобразований выражение относительно  $\mu_\sigma$  приняло вид:

$$\mu_\sigma = 2 \cdot \frac{\sigma_t}{p} \cdot \frac{(2 + \sqrt{p/\sigma_t})}{(1 + \sqrt{p/\sigma_t})}$$

Экспериментальным обоснованием определения коэффициента Пуассона  $\mu_\sigma$  служат результаты сопоставления значений, определенных предлагаемым способом, со значениями  $\mu^k$ , определенными известным косвенным способом (патент РФ №2447284, кл. E21C 39/00, G01N 3/08, 2012) и с расчетными безразмерными параметрами метода построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении (ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. Приложение 2 обязательное. Методы построения паспорта прочности»). При этом в качестве исходных данных для расчетного метода были использованы значения пределов прочности при одноосном сжатии  $\sigma_c$  и

растяжении  $\sigma_p$ , определенные методом нагружения сферическими инденторами, а в качестве аналога коэффициента Пуассона была использована сумма безразмерных параметров расчетного метода  $(K_1+q_1)$  и  $q_2$ , по физическому смыслу подобная коэффициенту Пуассона  $\mu_\sigma$

В таблице 4 представлены значения коэффициентов Пуассона  $\mu_\sigma$  и  $\mu^K$  и суммы безразмерных параметров  $(K_1+q_1)$  и  $q_2$  для горных пород или хрупких материалов, характеризующихся показателем хрупкости  $K_{хр}$  (отношением  $\sigma_c/\sigma_p$ ) в диапазоне от 5 до 20. Сравнение вычисленных значений коэффициента Пуассона свидетельствует о вполне приемлемой сходимости результатов. Отклонение значений  $\mu_\sigma$ , определенных предлагаемым способом, как правило, не превышало 10% и по сравнению с результатами определения известным косвенным способом, в среднем, составило 8%.

В качестве примера эффективности использования способа в таблице 5 представлены результаты сопоставительных механических испытаний по определению комплекса механических характеристик кембрийской глины (Метрострой, Санкт-Петербург), выполненных согласно предлагаемому способу, а также расчетным методом по ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения прочности при объемном сжатии. Приложение 2 обязательное. Методы построения паспорта прочности» и путем проведения объемных испытаний по ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения прочности при объемном сжатии».

Показатели механических свойств кембрийской глины, вычисленные расчетным методом, были основаны на экспериментальных данных о пределах прочности при одноосном растяжении и сжатии, определенных способом-прототипом и составили 0,437 и 2,59 МПа, соответственно.

Испытания на объемное сжатие цилиндрических образцов кембрийской глины были выполнены в стабилометре запредельного деформирования БВ-21, подключенном к насосной станции, рассчитанной на создание давления рабочей жидкости до 60 МПа, и установленном на гидравлическом прессе ЦДМ-100, рассчитанном на создание сжимающего усилия до 100 тонн. Для построения паспорта прочности были использованы результаты определения пределов прочности  $\sigma_1$  при заданных величинах бокового гидростатического давления  $\sigma_3$  в диапазоне от 0,5 до 6,0 МПа. Величина максимального сопротивления срезу по данным определения пределов прочности при объемном сжатии была вычислена как максимальное (асимптотическое) значение предельных касательных напряжений, соответствующих предельным кругам напряжений Мора.

Сравнение вычисленных значений показателей механических свойств кембрийской глины различными способами свидетельствует о вполне приемлемой сходимости результатов. Отклонение значения  $\tau_{max}^k$ , определенного предлагаемым способом от аналогичных экспериментальных и расчетных значений составило -2,4 и -5,8%, соответственно. Отклонение значения предела прочности  $\sigma_{вр}^k$  образцов кембрийской глины при всестороннем растяжении от расчетного значения  $\sigma_0$  составило 8,3%.

Отклонение значения коэффициента Пуассона  $\mu_\sigma=0,36$ , определенного предлагаемым способом, от аналогичных значений  $\mu^K=0,36$  и  $(K_1+q_1)+q_2=0,37$ , определенных известным косвенным способом (патент РФ №2447284, кл. E21C 39/00, G01N 3/08, 2012) и по данным ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при

объемном сжатии. Приложение 2 обязательное. Методы построения паспорта прочности», составило -0,9 и -4,5%, соответственно.

Реализация способа позволяет существенно упростить испытания, повысить точность и информативность определения механических свойств горных пород и материалов, имеющих хрупкий характер разрушения, доступным и весьма производительным методом нагружения образцов произвольной, в том числе неправильной, формы сферическими инденторами.

Табл.1

Способ определения механических свойств образцов горных пород и материалов

№ п/п	Наименование горной породы или хрупкого материала	Предлагаемый способ			Способ-прототип			Отклонение результатов, %
		L <sub>л</sub> мм	D <sub>опт</sub> мм	F, см <sup>2</sup>	D, мм	h, мм	F, см <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Мергель	8	4	1,01	8	3,8	0,96	5,3
2	Переслаивание мергеля с алевролитом	7,5	5	1,18	7	5	1,10	7,1
3	Алевролит-1	9	6	1,70	9	6,5	1,84	-7,7
4	Алевролит-2	11	4,8	1,66	11	4,8	1,66	0
5	Аргиллит	9,5	7	2,09	9	7	1,98	5,6
6	Известняк-1	9,5	6,2	1,85	11,5	5,5	1,99	-6,9
7	Известняк-2	7	4	0,88	7	4	0,88	0
8	Мрамор	6	3,5	0,66	6	3,2	0,60	9,4
9	Песчаник-1	10,5	7	2,31	9,5	7,5	2,24	3,2
10	Песчаник-2	7	3,7	0,81	7	3,5	0,77	5,7
11	Андезит	8,8	6,8	1,88	8,6	6,6	1,78	5,4
12	Долерит	6,5	4,1	0,84	6,3	3,9	0,77	8,5
13	Амфиболит	8,5	7,5	2,00	8,5	7	1,87	7,1
14	Гнейс-габбро	4	3,5	0,44	4	3,3	0,41	6,1
15	Гранит	12,5	6,5	2,55	11	7	2,42	5,5
16	Кембрийская глина	14	9,5	4,18	13,3	10,5	4,39	-4,8
17	Уголь	11,1	4,2	1,46	11	3,8	1,31	11,5
18	Железная руда	14,2	8	3,57	14	7,7	3,39	5,4
19	Гипс	11,5	10,5	3,79	11	10	3,46	9,8
20	Канифоль	9,5	7	2,09	10,5	6,5	2,14	-2,6
21	Эпоксидная смола	4	3,2	0,40	3,9	3,1	0,38	5,9
22	Эквивалентный материал (песчано-эпоксидный)	20,5	19	12,24	20	18,5	11,62	5,3

Табл. 2

Способ определения механических свойств образцов горных пород и материалов

№ п/п	Показатель хрупкости K <sub>хр</sub> =σ <sub>c</sub> /σ <sub>p</sub>	Безразмерные значения прочности при всестороннем растяжении		Отклонение результатов, %
		$\sigma_{вр}^к / \sigma_t$ (предлагаемый способ)	σ <sub>c</sub> /σ <sub>t</sub> (расчет по ГОСТ 21153.8-88)	
1	2	3	4	5
1	5,51	2,00	1,84	8,8
2	6,09	2,00	1,85	7,9
3	6,67	2,00	1,86	7,3
4	8,38	2,00	1,89	5,9
5	10,63	2,00	1,90	5,0
6	12,85	2,00	1,92	4,1
7	15,60	2,00	1,93	3,6
8	18,33	2,00	1,94	3,3
9	21,58	2,00	1,94	3,0

Табл.3

№ п/п	Показатель предельного напряженного состояния $K=r/\sigma_t$	Показатель хрупкости $K_{xp}=\sigma_c/\sigma_p$	Безразмерные значения максимального сопротивления срезу $\tau_{max}/\sigma_t$		Отклонение результатов, %
			предлагаемый способ	согласно ГОСТ 21153.8-88	
1	2	3	4	5	6
1	7	5,51	10,97	11,61	-5,5
2	8	6,09	14,24	14,81	-3,8
3	9	6,67	18,00	18,54	-2,9
4	12	8,38	32,20	32,51	-1,0
5	16	10,63	58,00	57,94	0,1
6	20	12,85	91,71	90,49	1,3
7	25	15,60	145,00	140,93	2,9
8	30	18,33	210,72	201,72	4,5
9	36	21,58	306,00	289,25	5,8

Табл.4

Способ определения механических свойств образцов горных пород материалов

№ п/п	Показатель хрупкости $K_{xp}=\sigma_c/\sigma_p$	Коэффициент Пуассона $\mu_\sigma$	Коэффициент Пуассона $\mu^k$	Сумма параметров $(K_1+q_1)+q_2$	Отклонение результатов определения коэффициентов Пуассона, %
		(предлагаемый способ)	(косвенный способ)	(согласно ГОСТ 21153.8-88)	
1	2	3	4	5	6
1	5,51	0,36	0,40	0,42	8,7
2	6,09	0,32	0,34	0,36	7,9
3	6,67	0,28	0,30	0,31	7,4
4	8,38	0,20	0,22	0,22	7,1
5	10,63	0,15	0,16	0,15	7,6
6	12,85	0,12	0,13	0,11	8,4
7	15,60	0,09	0,10	0,09	9,3
8	18,33	0,08	0,09	0,07	10,2
9	21,58	0,06	0,07	0,06	11,2

Табл.5

Способ определения механических свойств

Определение прочности при объемном сжатии по ГОСТ 21153.8-88		Расчетный способ по ГОСТ 21153.8-88			Предлагаемый способ	
Боковое давление $\sigma_3$ , МПа	Осевое давление $\sigma_1$ , МПа	Максимальное сопротивление срезу, МПа	Предел прочности при всестороннем растяжении, МПа	Максимальное сопротивление срезу, МПа	Предел прочности при всестороннем растяжении, МПа	Максимальное сопротивление срезу, МПа
1	2	3	4	5	6	7
0,5	4,47 4,02	3,30	0,456	3,42	0,494	3,22
1,5	6,91					
3,0	9,00 9,62					
5,0	11,53 10,50					
6,0	12,66 11,26					

Формула изобретения

1. Способ определения механических свойств образцов горных пород и материалов,

включающий нагружение образца двумя встречно направленными сферическими инденторами до его раскалывания, фиксирование разрушающей силы, определение в разрушенном образце площади поверхности трещины отрыва, проходящей через ось нагружения, и геометрических параметров разрушенных зон в областях контакта с обоими сферическими инденторами, вычисление растягивающего напряжения разрыва образца и среднего сжимающего напряжения на границе большей из разрушенных зон и определение в качестве механических свойств образца предела прочности и сопротивления срезу, отличающийся тем, что из обломков разрушенного образца собирают составной образец, на торцах которого определяют геометрические параметры разрушенных зон - диаметр остаточных отпечатков от инденторов и длину лунок выкола вдоль поверхности трещины отрыва, определяют площадь поверхности большей разрушенной зоны на контакте с инденторами по формуле:

$$F = \pi \cdot D_{\text{отп}} \cdot L_{\text{л}},$$

где  $F$  - площадь поверхности большей разрушенной зоны;

$D_{\text{отп}}$  - диаметр остаточного отпечатка от индентора;

$L_{\text{л}}$  - длина лунки выкола вдоль поверхности трещины отрыва;

$$\pi = 3,14,$$

а в качестве механических свойств образца определяют предел прочности при всестороннем растяжении  $\sigma_{\text{вр}}^{\text{к}}$ , максимальное сопротивление срезу  $\tau_{\text{max}}^{\text{к}}$  и коэффициент Пуассона  $\mu_{\sigma}$  по формулам:

$$\sigma_{\text{вр}}^{\text{к}} = 2 \cdot \sigma_{\text{т}};$$

$$\tau_{\text{max}}^{\text{к}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{p \cdot \sigma_{\text{т}}} + \frac{p}{\sigma_{\text{т}}} \cdot \frac{(p - 3 \cdot \sigma_{\text{т}})}{4};$$

$$\mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_{\text{т}}}{p} \cdot \frac{(2 + \sqrt{p/\sigma_{\text{т}}})}{(1 + \sqrt{p/\sigma_{\text{т}}})}$$

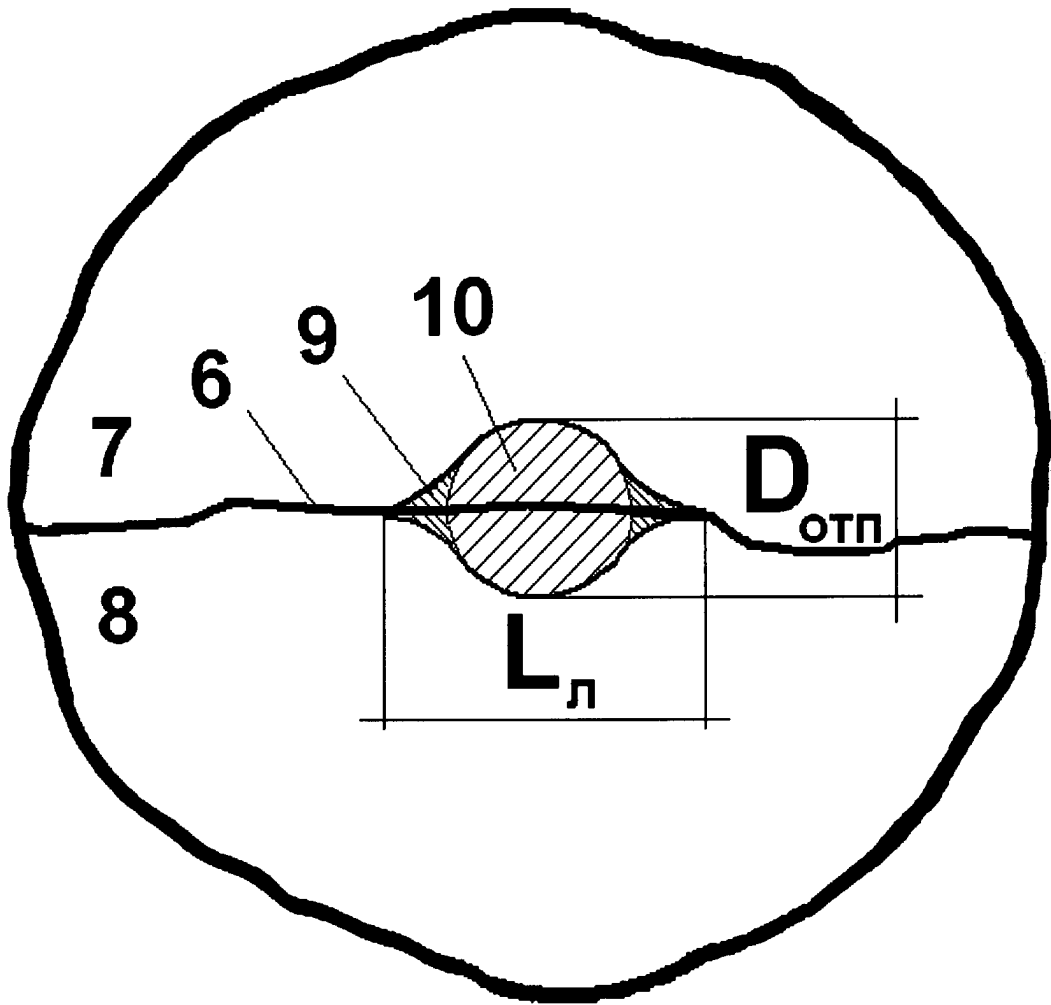
где  $\sigma_{\text{т}}$  - растягивающее напряжение разрыва образца;

$p$  - среднее сжимающее напряжение на границе большей из разрушенных зон.

35

40

45



Фиг. 2