

*А. И. Чанышев<sup>1,2\*</sup>, И. М. Абдулин<sup>1</sup>, Д. О. Чещин<sup>1</sup>, В. В. Плохих<sup>1</sup>*

## **Применение щелевой разгрузки для определения смещений контура выработки**

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
- <sup>2</sup> Новосибирский государственный университет экономики и управления, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Аннотация.** Предлагается способ определения нормальных и тангенциальных смещений контура цилиндрической выработки в случае, когда они уже прошли в момент создания выработки. Для этого в нагруженном состоянии применяется щелевая разгрузка с замером смещений контура образующегося керна и контура образующейся скважины. Полные смещения контура выработки представляют собой сумму смещений контура скважины и смещений, взятых с обратным знаком, керна. Представленная идея провести на резиноподобных материалах при их растяжении с вырезом до приложения нагрузки и с вырезом кругового отверстия в растянутом состоянии.

**Ключевые слова:** выработка, смещения, разгрузочная щель, цилиндрическая щель, напряжения, керн, контур скважины

*A. I. Chanyshev<sup>1\*</sup>, I. M. Abdulin<sup>1</sup>, D.O. Cheshchin<sup>1</sup>, V.V. Plokhikh<sup>1</sup>*

## **Application of slot unloading to determine displacements of the excavation contour**

- <sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
- <sup>2</sup> Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

**Annotation.** A method is proposed for determining the normal and tangential displacements of the contour of a cylindrical excavation in the case when they have already passed at the time of creation of the excavation. To do this, in a loaded state, slot unloading is used with measurement of displacements of the contour of the resulting core and the contour of the resulting well. The total displacements of the excavation contour are the sum of the displacements of the well contour and the displacements, taken with the opposite sign, of the core. The presented idea is carried out on rubber-like materials when they are stretched with a cutout before applying a load and with a cutout of a circular hole in the stretched state.

**Keywords:** workings, displacements, unloading slot, cylindrical slot, stresses, core, well contour

## Введение

Щелевая разгрузка создается для исследования нагруженного состояния керна (рис. 1а), состояния материала вокруг скважины (рис. 1б), для определения полных смещений контура выработки, когда они уже прошли в момент ее создания (рис. 1в)

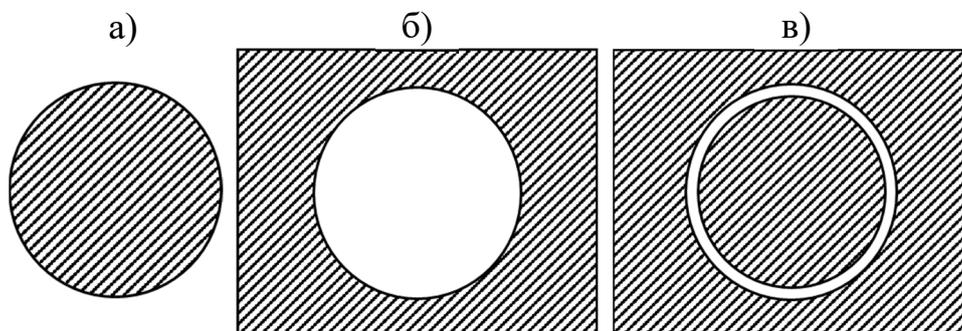


Рис. 1. Щелевая разгрузка в трех типовых ситуациях

Проведем краткий анализ представленной на рис. 1 ситуации. На нем представлена точка в массиве горных пород с окрестностью в виде керна [1-5]. Если на границе керна в момент создания разгрузочной щели измерять граничные смещения, то получим граничные условия второй краевой задачи механики деформируемого твердого тела с оценкой напряженно-деформированного состояния в окрестности данной точки. Эту ситуацию возможно использовать для проверки численных результатов с применением различных вычислительных комплексов типа ANSYS. Вторая ситуация (рис. 1б) относится к скважинным методам измерений напряжений в массиве горных пород. Отличительной особенностью скважинных методов является оценка смещений, образованных скважиной (полостью) в нагруженном состоянии массива пород. Здесь смещения – результат создания отверстия, но это еще не полные смещения контура выработки в момент ее создания (не учтены смещения за счет первоначальной нагруженности массива пород). К скважинным методам можно отнести [6-9]. Третья ситуация представлена на рис. 1в. Здесь в процессе образования разгрузочной щели измеряется как смещения образуемого керна, так и смещения контура скважины. Для получения полных смещений контура выработки необходимо к смещениям контура скважины добавить с противоположным знаком смещения контура керна [10].

Ниже приводится на примере резиноподобного материала проверка расчетной схемы.

### *Методика измерения смещений резины в нагруженном состоянии*

В основу методики положен метод фотограмметрии, в котором измерения смещений реперов на листе резины велось с помощью снимков цифрового фотоаппарата.

В качестве регистратора смещения реперов использовался фотоаппарат Sony DSC-HX300 с разрешением съемки 5184x3888 пикселей. Обработка фотографий производилась на ПК с помощью графического редактора.

Фотография стенда, на котором проведены измерения смещений, представлена на рис. 2.

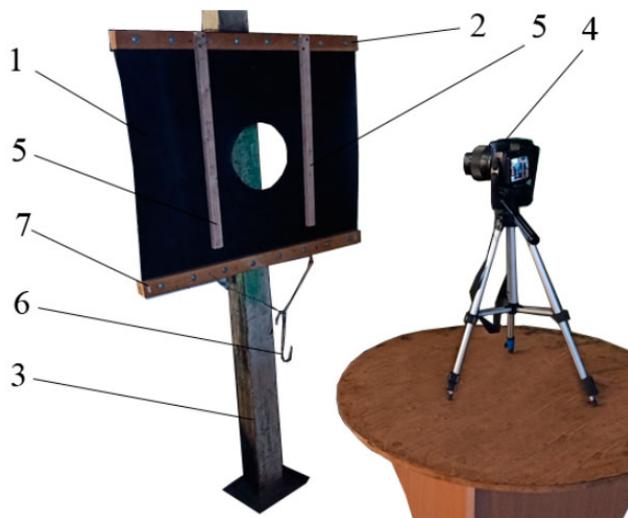


Рис. 2. Стенд: 1 – лист резины; 2 – верхняя крепежная рейка; 3 – неподвижная опора; 4 – цифровой фотоаппарат; 5 – фиксирующие планки; 6 – крюк; 7 – нижняя крепежная рейка

Стенд состоит из листа резины 1, закрепленного через верхнюю крепежную рейку 2 к неподвижной опоре 3. Фиксация смещений производилась с помощью цифрового фотоаппарата 4, установленного напротив центра листа 1. Для определения смещений резины к верхней крепежной рейке 2 были закреплены фиксирующие планки 5 с отметками на них, с целью последующего масштабирования и совмещения полученных фотографий. Подвешивание груза осуществлялось на крюк 6, который был непосредственно связан с нижней крепежной рейкой 7.

В качестве материала, на котором определялись смещения, использовался лист резины толщиной 1 мм, имеющего ширину 800 мм и длину 680 мм с модулем упругости  $E = 10,834$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,5$ . Масса груза равнялась 10,6 кг ( $F=106$  Н).

### *Эксперимент. Часть 1*

Первоначально на листе производилась разметка с целью определения центральной точки и размечался контур вырезаемой части. Далее происходило установка листа резины на стенд и фотофиксация контрольных точек (рис. 3а). На следующем этапе происходило подвешивание на лист груза и повторная фотофиксация (рис. 3б). После этого происходило вырезание намеченного контура и фотофиксация под нагрузкой (рис. 3в).

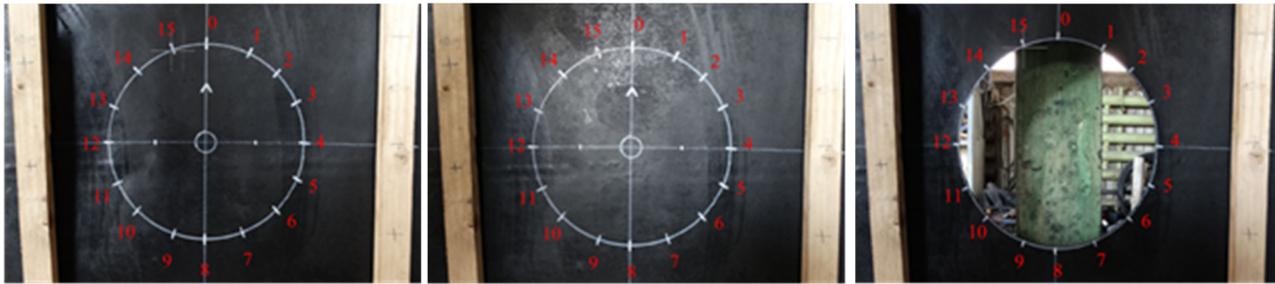


Рис. 3. Образец с нанесенным контуром окружности: (а) в свободном состоянии, (б) в нагруженном состоянии, (в) с вырезанным отверстием и в нагруженном состоянии

Для определения величин смещений был рассчитан масштабный коэффициент преобразования:

$$k_p = \frac{H_m}{H_p},$$

где  $H_m$  – натурное расстояние отрезка на фотографии, мм;  $H_p$  – количество пикселей в этом отрезке на фотографии, пиксель. Таким образом получаем:

$$k_p = \frac{100}{904} = 0,11 \text{ мм/пиксель.}$$

В результате проведенных экспериментов получены смещения (Таблица 1) контрольных точек на образце без выреза под нагрузкой ( $dx_1, dy_1$ ), с вырезом под нагрузкой ( $dx_2, dy_2$ ). Положительные значения  $dx$  соответствуют смещению вправо, отрицательные – влево. Положительные значения  $dy$  соответствуют смещению вверх, отрицательные – вниз (направление действия нагрузки).

Таблица 1

Смещения контрольных точек в декартовой системе координат (мм)

| без выреза |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| № реп.     | 8      | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
| угол, град | -90    | -67,5  | -45    | -22,5  | 0      | 22,5   | 45     | 67,5   | 90     |
| $dy_1$     | -4,204 | -4,425 | -4,535 | -4,314 | -3,650 | -2,876 | -2,323 | -1,881 | -1,770 |
| $dx_1$     | -1,549 | -1,549 | -1,438 | -0,996 | -0,553 | -0,774 | -0,553 | -0,774 | -0,664 |
| № реп.     | 0      | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8      |
| Угол       | 90     | 112,5  | 135    | 157,5  | 180    | 202,5  | 225    | 247,5  | 270,00 |
| $dy_1$     | -1,770 | -1,549 | -1,881 | -2,212 | -2,987 | -3,540 | -3,982 | -3,982 | -4,204 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $dx_1$     | -0,664 | -0,774 | -0,885 | -1,217 | -1,438 | -1,549 | -1,217 | -1,327 | -1,549 |
| с вырезом  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| № реп.     | 8      | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
| угол, град | -90    | -67,5  | -45    | -22,5  | 0      | 22,5   | 45     | 67,5   | 90     |
| $dy_2$     | -5,808 | -5,144 | -3,706 | -2,489 | -0,719 | 1,493  | 3,042  | 4,259  | 5,808  |
| $dx_2$     | -2,212 | -1,549 | -1,770 | -1,881 | -1,549 | -0,996 | -0,885 | -0,664 | -1,217 |
| № реп.     | 0      | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8,00   |
| угол, град | 90     | 112,5  | 135    | 157,5  | 180    | 202,5  | 225    | 247,5  | 270,00 |
| $dy_2$     | 5,808  | 4,480  | 3,042  | 1,604  | 0,166  | -1,604 | -2,378 | -4,480 | -5,808 |
| $dx_2$     | -1,217 | 1,217  | 1,327  | 1,438  | 1,549  | 1,881  | 1,991  | 2,434  | -2,212 |

На рис. 4 смещения  $dx_2$ ,  $dy_2$  представлены в виде графиков.

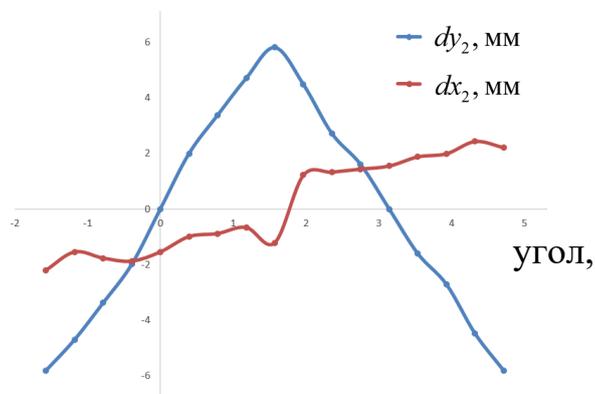


Рис. 4. Графики смещений  $dx_2$ ,  $dy_2$  в зависимости от угла реперной точки

### Эксперимент. Часть 2

Во второй части экспериментов нанесение контура вырезаемой части наносилось в нагруженном состоянии образца.

В нагруженном состоянии на образец с помощью круглого шаблона, имеющего диаметр 199 мм, был нанесен контур вырезаемого отверстия. По краям окружности отмечались 16 контрольных точек (рис. 5а).

После этого происходило вырезание отверстия по внутренней границе контура. По завершении производилась фотофиксация контрольных точек (рис. 5б). Далее была проведена фотофиксация соответствующих контрольных точек на вырезанном участке образца (рис. 5в).

В результате проведенных экспериментов получены смещения контрольных точек на образце после выреза (внешняя окружность  $dx_1$ ,  $dy_1$ ), на вырезанном участке (внутренняя окружность  $dx_2$ ,  $dy_2$ ).

Полные смещения контура выработки представляют собой сумму смещений контура внешней части и смещений контура внутренней части, взятых с обратным знаком ( $dx_1 - dx_2$ ,  $dy_1 - dy_2$ ). Полученные данные приведены в таблице 3 и соответствующих графиках на рис. 6.

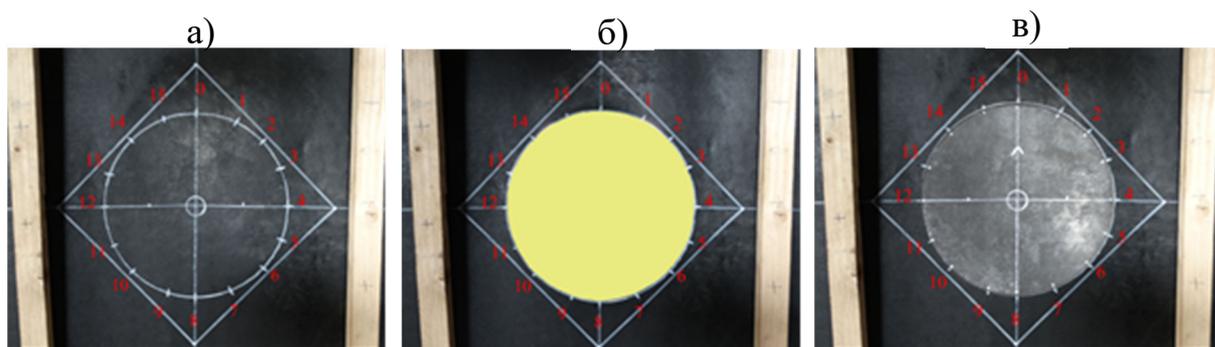


Рис. 5. Образец: (а) в нагруженном состоянии и последующим нанесением на него контура окружности, (б) в нагруженном состоянии и с вырезанным отверстием, (в) вырезанная окружность в свободном состоянии

Таблица 3

Смещения (мм) контрольных точек на образце после выреза ( $dx_1, dy_1$ ), на вырезанном участке ( $dx_2, dy_2$ ) и полные смещения (мм) ( $dx_1 - dx_2, dy_1 - dy_2$ ) в реперных точках.

|               |  | Внешняя часть    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |  | 8                | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
| $dx_1$        |  | -0,111           | -0,332 | -0,442 | -0,664 | -0,553 | -0,553 | -0,553 | -0,774 | 0,000  |
| $dy_1$        |  | -3,706           | -2,600 | -1,604 | -1,051 | 0,277  | 1,162  | 1,936  | 2,931  | 3,706  |
|               |  | 0                | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8      |
| $dx_1$        |  | 0,000            | 0,553  | 0,442  | 0,664  | 0,553  | 0,442  | 0,442  | 0,442  | -0,111 |
| $dy_1$        |  | 3,706            | 2,821  | 1,936  | 1,162  | 0,277  | -0,719 | -1,383 | -2,489 | -3,706 |
|               |  | Внутренняя часть |        |        |        |        |        |        |        |        |
|               |  | 8                | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
| $dx_2$        |  | 0,000            | 0,332  | 0,553  | 0,111  | 1,549  | 1,881  | 1,438  | 1,106  | 0,664  |
| $dy_2$        |  | 2,212            | 2,655  | 2,655  | 1,770  | 1,217  | 0,553  | -0,442 | -1,106 | -2,212 |
|               |  | 0                | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8      |
| $dx_2$        |  | 0,664            | 0,000  | -0,996 | -1,549 | -1,106 | 0,111  | 0,000  | 0,332  | 0,000  |
| $dy_2$        |  | -2,212           | -1,991 | -1,881 | 0,000  | 0,996  | 1,770  | 1,549  | 1,991  | 2,212  |
|               |  | Полные смещения  |        |        |        |        |        |        |        |        |
|               |  | 8                | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
| $dy_1 - dy_2$ |  | -5,918           | -5,254 | -4,259 | -2,821 | -0,940 | 0,608  | 2,378  | 4,038  | 5,918  |
| $dx_1 - dx_2$ |  | -0,111           | -0,664 | -0,996 | -0,774 | -2,102 | -2,434 | -1,991 | -1,881 | -0,664 |
|               |  | 0                | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8      |
| $dy_1 - dy_2$ |  | 5,918            | 4,812  | 3,816  | 1,162  | -0,719 | -2,489 | -2,931 | -4,480 | -5,918 |
| $dx_1 - dx_2$ |  | -0,664           | 0,553  | 1,438  | 2,212  | 1,659  | 0,332  | 0,442  | 0,111  | -0,111 |

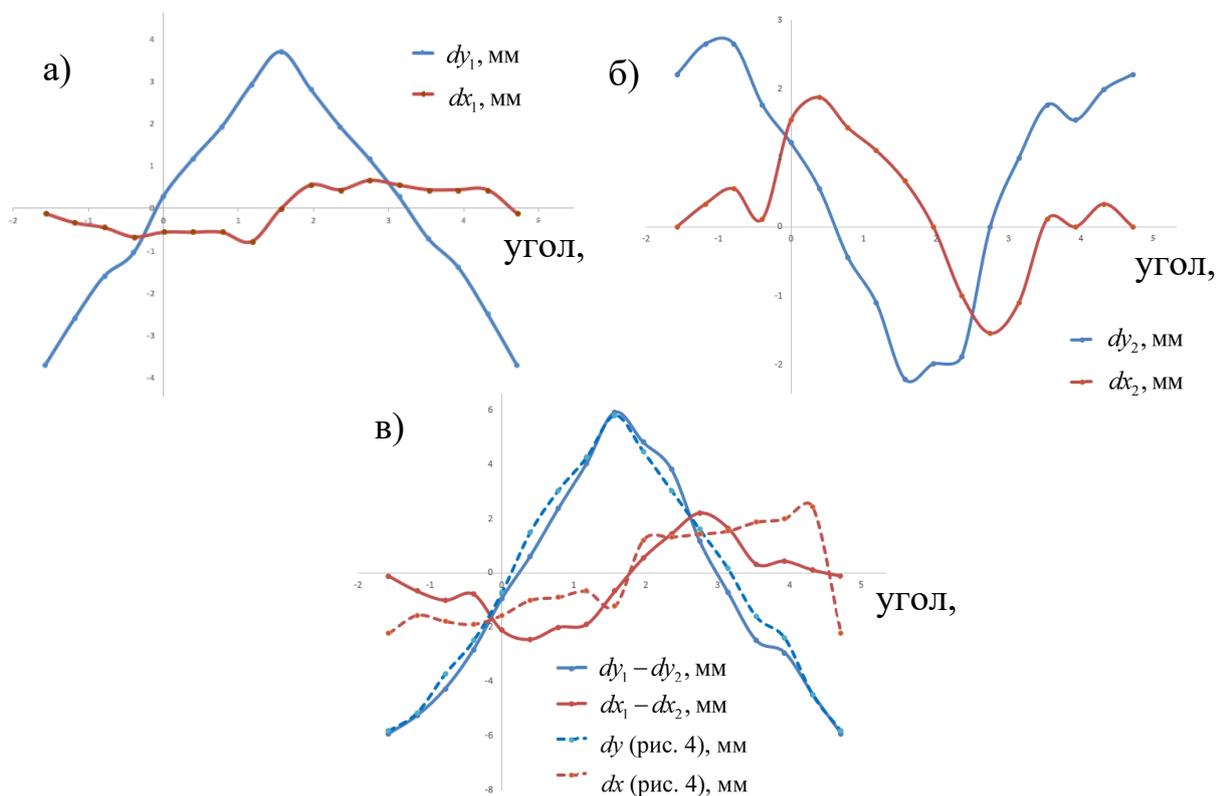


Рис. 6. Графики смещений  $dx$  и  $dy$  в зависимости от угла реперной точки: а) внешняя окружность; б) внутренняя окружность; в) полные смещения

Графики рис. 6в показывают удовлетворительное сходство с графиками рис. 4, что говорит о применимости указанной методики для определения полных смещений контура выработки.

### **Заключение**

Показано, что полные смещения контура выработки представляют собой сумму слагаемых – слагаемого, связанного с образованием скважины, и слагаемого, обусловленного начальным нагружением массива пород. Проведена серия экспериментов на резиноподобных материалах, в которых отверстие образовывалось до нагружения материала и под загрузкой.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-17-00188.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Хаст Н., Нильсон Т. Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. - Вып. 4. -М.: Мир, 1967. - С. 94 - 105.
2. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сборник научных трудов. – 1980. – С. 30 – 35.
3. Феклистов Ю.Г. Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // Проблемы недропользования. 2017. №4 (15). С 28-32.

4. Leeman E. R. The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography) // Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1971. P. 200–229.
5. Кузнецов С. В., Савостьянов Е. В. Способ измерения механических напряжений в массиве горных пород // Патент РФ 846730, 15.07.1981 Бюл. № 26.
6. Ljunggren C. An overview of rock stress measurement methods // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. – 2003. – V. 40. – P. 975-989
7. Курленя, М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород – Новосибирск: Наука, 1999. – 219 с.
8. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах. – Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
9. Ju W., Jiang B., Miao Q. et al. Variation of in situ stress regime in coal reservoirs, eastern Yunnan region, South China: Implications for coalbed methane production // AAPG Bulletin. – 2018. – Т. 102. – №. 11. – С. 2283-2303.
10. Чанышев А. И., Плохих В. В., Городилов Л. В., Абдулин И. М., Чещин Д. О. Способ определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Патент РФ 2812358, 30.01.2024 Бюл. № 4.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, Д. О. Чещин, В. В. Плохих, 2024