

## Об одном способе определения НДС массива пород вокруг горной выработки

*А. И. Чанышев<sup>1,2\*</sup>, И. М. Абдулин<sup>1</sup>*

<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 оценки НДС массива пород как на контуре самой выработки, так и в его окрестности, основанный на методе разгрузки (ВНИМИ, Хаст, Лиман), отличающийся образованием щели, повторяющей контур исследуемой выработки. При измерении смещений внешнего контура щели, совпадающего по форме с освобождаемым от напряжений контуром выработки, получается необходимая информация для прогнозирования поведения массива пород как на самом контуре выработки, так и вблизи его.

**Ключевые слова:** разгрузка, контур выработки, напряжения, деформации, смещения, вектор поворота

## On one method for determining the stress-strain state of a rock mass around a mine working

*A. I. Chanyshev<sup>1,2\*</sup>, I. M. Abdulin<sup>1</sup>*

<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

**Abstract.** A method is proposed for estimating the stress-strain state of a rock mass both on the contour of the working itself and in its vicinity, based on the unloading method (VNIMI, Khast, Liman), characterized by the formation of a gap that repeats the contour of the studied working. When measuring the displacements of the outer contour of the slot, which coincides in shape with the destressed contour of the working, the necessary information is obtained to predict the behavior of the rock mass both on the contour of the working and near it.

**Keywords:** unloading, working contour, stresses, deformations, displacements, rotation vector

### *Введение*

Вопросы, касающиеся обеспечения безопасности ведения горных работ, продолжают оставаться актуальными на современном этапе развития производства [1, 2]. Основными из них являются определение напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработок с целью предсказания катастрофических событий типа горных ударов, внезапных выбросов газа и угля и т.п. Для решения задач в указанном направлении необходимо знание напряже-

ний в нетронутым массиве пород. Для определения величин и направлений главных напряжений в массиве пород получили распространение такие методы исследований как метод разгрузки (полной и частичной) [3-7], метод компенсационной нагрузки (восстановление напряжений) [8-10], разности давлений [11], упругих динамометров [12], измерения деформации стенок буровых скважин [13], геофизические методы [14]. Метод полной разгрузки основан на упругом восстановлении формы и размеров элементов породного массива при искусственном нарушении его связи с основным массивом. Различаются схема ВНИМИ [3], схема Н. Хафта [4], схема Е. Лимана [5]. В схеме ВНИМИ производится измерение торца скважины при выбривании керна, в схеме Хафта измеряется сокращение диаметра центрального отверстия в выбуриваемом керне, в схеме Лимана измеряются деформации стенки центрального отверстия в выбуриваемом керне. Метод частичной разгрузки основан на измерении деформаций на поверхности обнажения массива при частичной разгрузке, метод компенсационной нагрузки заключается в первоначальном снятии и последующем искусственном восстановлении напряжений на изучаемом участке массива пород. Метод разности давлений применяется для определения дополнительных напряжений, возникающих в результате ведения горных работ.

Отметим, что в перечисленных работах речь идет лишь об определении величин и направлений главных напряжений, о средней величине напряжения, нормального к поверхности скважины, о средней величине приложенного напряжения на базе измерений (геофизические методы, электрические измерения).

### *Методы и материалы*

В предлагаемом исследовании будет говориться о значениях всех компонент тензоров напряжений и деформаций, о всех компонентах вектора поворота (в этом направлении проводятся работы, например, [15]).

Прежде, чем излагать суть предлагаемого способа, рассмотрим вопрос о задании граничных условий на контуре выработки. Вопрос ставится так: когда следует задавать краевые условия – до деформации контура выработки или после? Каково будет отличие этих постановок в решении задачи? Обратимся к анализу рис. 1, где изображен контур выработки. На контуре помечена точка  $A$ . Пусть  $r$  и  $\theta$  – полярные координаты этой точки и уравнение контура выработки до его деформации имеет уравнение  $r = r(\theta)$ .

Пусть в результате приложенных сил (на «бесконечности») точки контура выработки и в том числе точка  $A$  получают смещения  $u_1$  и  $u_2$  соответственно направлениях ортов  $\vec{e}_1$  и  $\vec{e}_2$ , изображенных на рис 1.

При этом точка  $A$  сместится так, что в направлении орта  $\vec{e}_1$  ее положение будет характеризоваться величиной  $\tilde{r} = r + u_1$  и угол  $\theta$  в направлении орта  $\vec{e}_2$  получит новое значение  $\tilde{\theta} = \theta + u_2 / r$  (отметим, что в треугольнике  $OAB$  тангенс угла  $d\theta$ , равный отношению  $u_2 / r$ , можно в силу малости угла заменить на сам угол  $d\theta$ ).

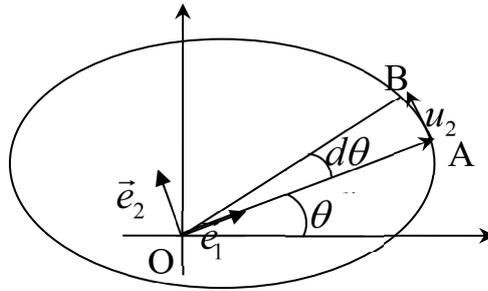


Рис. 1. Выработка с уравнением границы  $r = r(\theta)$ , точка  $A$  находится на контуре выработки

Как результат находим

$$\tilde{r} = r(1 + u_1 / r), \quad \tilde{\theta} = \theta(1 + u_2 / r\theta). \quad (1)$$

Выражения  $u_1 / r$ ,  $u_2 / r\theta$  являются деформациями. Предполагается, что деформации малы по сравнению с «единицей». Поэтому из (1) следует, что

$$\tilde{r} \approx r, \quad \tilde{\theta} \approx \theta. \quad (2)$$

Формулы (2) означают то, что контур выработки в результате деформации массива пород не искажился. То есть краевые условия можно задавать как на контуре выработки до деформации, так и после. Результат будет одним и тем же.

Обратимся теперь к изложению предлагаемого способа определения НДС вокруг выработки. Пусть имеется выработка с контуром, выражаемым уравнением

$$r = r(\theta). \quad (3)$$

Для простоты ограничимся случаем, когда этот контур свободен от напряжений. Если это – реальная выработка, то все смещения на этом контуре уже произошли в момент образования выработки. Стоит такая задача – исходя из (2) восстановить смещения контура выработки. Для этих целей предлагается на отшлифованной поверхности массива пород нарисовать контур самой выработки (как в [1-5] предлагается эти действия произвести в трех взаимноортогональных направлениях на трех взаимноортогональных площадках). Далее изображенный контур выработки освобождается от напряжений, причем от точки к точке с применением боковой части бурового инструмента как показано рис. 2.

На изображенном контуре выработки помечаются точки в определенном порядке, положения которых отслеживаются с помощью фотокамеры. В результате освобождения контура выработки от напряжений производится отсчет смеще-

ний этих точек от первоначального положения во взаимно ортогональных направлениях.

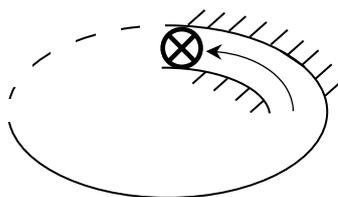


Рис. 2. Буровой инструмент в применении к определению смещений на контуре выработки

Как итог, на контуре выработки, свободном от напряжений, получаем известными следующие величины как функции параметра границы (полярного угла  $\theta$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_n(\theta) = 0, \quad \tau_n(\theta) = 0, \\ u_n(\theta) = f(\theta), \quad u_t(\theta) = \varphi(\theta). \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n$  – направление нормали,  $t$  – тангенциальное направление.

Полученных данных (4) достаточно для определения НДС контура самой выработки и состояния массива пород вокруг него [16].

В качестве примера рассмотрим задачу об определении НДС массива пород вокруг выработки радиуса  $r = a$  в случае идеальной пластичности (рис. 3).

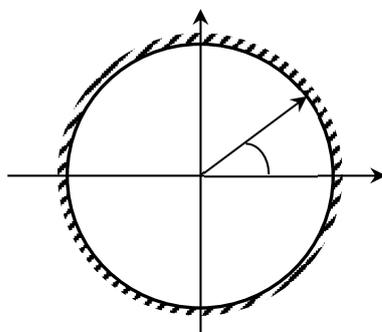


Рис. 3. На границе задано напряжение  $\sigma_r = 0$ ,  $\tau_{r\theta} = 0$  и перемещения  $u_r = -u_0$  ( $u_0 > 0$ ),  $u_\theta = 0$

Пусть известно, что материал вокруг выработки находится в идеально-пластическом состоянии. Т.е. для него выполняется условие пластичности [17]

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2\tau_s. \quad (3)$$

где  $\tau_s$  – предел упругости материала на сдвиг.

Решая (3) вместе с уравнением равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0,$$

находим распределение напряжения  $\sigma_r$  вокруг выработки:

$$\sigma_r = -2\tau_s \ln \frac{r}{a}. \quad (4)$$

Здесь  $a$  – радиус выработки. Из (4) следует, что  $\sigma_r|_{r=a} = 0$ .

Далее, для того, чтобы найти распределение перемещения  $u$  вокруг выработки, рассмотрим условие упругого измерения объема:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2k}. \quad (5)$$

где  $\varepsilon_z = 0$ ,  $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$ ,  $2k = E / (1 + \nu_*)(1 - 2\nu_*)$ , коэффициент Пуассона  $\nu_*$  в упругости есть величина постоянная, а в пластичности величина  $\nu_* \rightarrow 0.5$  [18].

Подставляя в (5) условия Коши

$$\varepsilon_r = du / dr, \quad \varepsilon_\theta = u / r, \quad (6)$$

получаем дифференциальное уравнение для  $u$  вида:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = \frac{\sigma_r - \tau_s}{k}. \quad (7)$$

С применением (4) находим

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = -\frac{\tau_s}{k} \left[ 1 + 2 \ln \frac{r}{a} \right]. \quad (8)$$

Решение (8) представляется как сумма общего решения однородного уравнение и частного решения неоднородного. Отсюда

$$u = -\frac{\tau_s}{k} r \ln \frac{r}{a} + \frac{C_1}{r},$$

где  $C_1$  – константа, находится из граничного условия  $u|_{r=a} = -u_0$ . С учетом него

$$C_1 = -u_0 a.$$

Тогда смещение  $u$  становится равным

$$\frac{u}{a} = -\frac{\tau_s}{k} \frac{r}{a} \ln \frac{r}{a} - \frac{u_0}{r}. \quad (9)$$

График зависимости  $u/a$  от  $r/a$  при  $u_0 = 0.01a$  приведен на рис. 4.

Найдем главный сдвиг  $\gamma_{\max} = (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) / 2$ . Имеем

$$\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} = \frac{u_0 a}{r^2} - \frac{\tau_s}{2k}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что максимальное значение  $\gamma$  достигается на границе  $r = a$ , оно равно

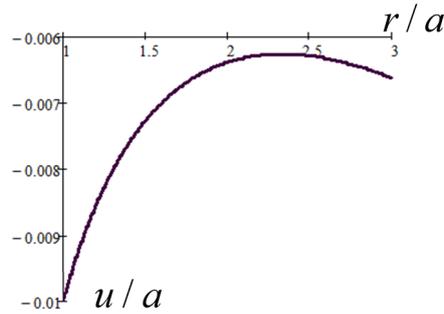


Рис. 4. Зависимость относительного радиального смещения от относительного радиуса при значениях параметров  $u/a$ ,  $\tau_s = 0.001k$

$$\gamma_{\max} = \frac{u_0}{a} - \frac{\tau_s}{2k}. \quad (11)$$

С ростом  $r$  величина  $\gamma$  убывает и становится равной предельному упругому сдвигу  $\tau_s / 2\mu$  при значении радиуса

$$\left(\frac{r}{a}\right)_* = \sqrt{\frac{u_0}{a} \frac{1}{\tau_s \left(\frac{1}{2\mu} + \frac{1}{2k}\right)}}.$$

Данный пример демонстрирует нахождение НДС массива пород вокруг выработки при известных значениях напряжений на контуре выработки и перемещений в случае идеальной пластичности.

### **Заключение**

1. Предложен способ определения НДС массива пород по данным измерений напряжений и смещений на контуре выработки.
2. Решена задача об определении НДС массива пород вокруг цилиндрической выработки в случае идеальной пластичности.

### **Благодарности**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00188).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. – 2-е изд – М.: Недра, 1994. – 278 с.
2. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – Издание 3 – Москва, 2012. – 543 с.
3. Кузнецов Г. Н., Слободов М. А. Определение методом разгрузки напряжений, действующих в междукамерных целиках каменной соли Артемовских рудников // Труды ВНИМИ. – 1950. – Вып. 22. – С. 151-174.
4. Хаст Н., Нильсон Г. Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. - Вып. 4. -М.: Мир, 1967. - С. 94 - 105.
5. Крупенников Г.А., Филатов Н.А., Амусин Б. З., Барковский В. М. Распределение напряжений в породных массивах. – М: Недра, 1972. – 144 с.
6. Курленя М. В., Устюгов М. Б. Руководство по применению метода буровых скважин для определения напряжения в осадочных породах / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т горного дела. - Новосибирск: [б. и.], 1969. - 22 с.
7. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Метод частичной разгрузки на большой базе // Диагностика напряженного состояния породных массивов Новосибирск: ИГД СО АН СССР. 1980, С. 37-42.
8. Влох Н. П., Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сб. науч. тр. // ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1980, С. 30 - 35.
9. Аксенов В. К., Курленя М. В., Петров А. И. Разгрузка массива щелью как средство для определения абсолютных напряжений в горных породах // ФТПРПИ. –1972. – №2. – С. 122-124.
10. Барях А. А., Еремина Н. А., Асанов В. А. Интерпретация результатов щелевой разгрузки // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. – Екатеринбург.: ГИУрО РАН, 1997. – С. 17-22.
11. Мурашев В. И., Шлиомовичус Я. Г., Сигарев В. А., Матвейчук В. А. Использование гидравлических датчиков для замера напряжений в угольных пластах // Измерение напряжений в массиве горных пород: Материалы I Всес. семинара. Новосибирск. – 1968. – С. 128-133.
12. Гребенкин, С. С., Павлыш, В. Н., Самойлов, В. Л., Петренко, Ю. А. (2010). Управление состоянием массива горных пород. Донецк: ДонНТУ. – 2010.
13. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. – Москва: изд-во МГУ, 2012. – 112 с.
14. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. – Академкнига, 2007.
15. Опанасюк А. А., Макаров В. В. Способ определения напряженно-деформированного состояния массива материала (Патент 2 322 657 С1)
16. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Определение напряженно-деформированного состояния горных пород по данным измерений на контуре выработки вектора напряжений Коши и вектора смещений // ФТПРПИ, – 2021. – №1. – С. 13-20.
17. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – Рипол Классик, 2013.
18. Христианович С. А., Шемякин Е. И. К теории идеальной пластичности // Изв. АН СССР, МТТ. – 1967. – №. 4. – С. 87-97.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2022