

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПОСЛЕ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

А.И. Чанышев^{1,2}, И.М. Абдулин¹

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет экономики и управления,
Новосибирск, Россия, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Аннотация: Для решения задач геомеханики требуется знать смещения контуров горных выработок. Они применяются как для проверки полученных решений, так и в разработке новых. Ситуация осложняется тем, что смещения становятся неизвестными, потому что они происходят одновременно с появлением выработки. Предлагается способ отыскания смещений границы горной выработки, когда смещения уже произошли в момент ее создания. Способ состоит в применении метода щелевой разгрузки с одновременным измерением смещений по обе стороны от щели. Щель имитирует контур выработки. Смещения границ керна демонстрируют напряженно-деформированное состояние нетронутого массива горных пород, смещения границы по другую сторону от щели характеризуют сам факт образования выработки. Суммарные смещения определяют полные смещения контура горной выработки в момент ее создания. При их отыскании используется метод геометрического подобия, связанный с макетированием контура выработки. Полученные смещения возможно использовать для анализа напряженно-деформированного состояния как самой границы выработки, так и ее окрестности, в состояниях упругости и неупругости (пластичности, запредельного деформирования).

Ключевые слова: смещения, выработка, макет, щелевая разгрузка, функциональная зависимость, полярный угол, прогноз, напряженное состояние.

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

Для цитирования: Чанышев А. И., Абдулин И. М. Определение смещений контура горных выработок после их образования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. – С. 20–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_20.

Determining displacements of boundary of underground openings after drivage

A.I. Chanyshev^{1,2}, I.M. Abdulin¹

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University of Economics and Management,
Novosibirsk, Russia, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Abstract: Geomechanical problem solving needs information on displacement of boundaries in underground openings after drivage. These data are used in development and verification of problem solutions. The situation is complicated by the fact that displacements are unknown

as they take place simultaneously with formation of an underground opening. The proposed approach uses the borehole stress-relief method with simultaneous measurement of displacements on both sides of the borehole. The borehole simulates the boundary of an underground opening. Displacements of the boundaries of the core characterize deformation of intact rock mass, while displacements of the boundary on the other side of the borehole are reflective of the fact of the underground opening formation. The total displacements define the total displacements of the boundary of an underground opening at the moment of its formation. The approach also involves the geometrical similarity method connected with physical simulation of the boundary of an underground opening. The measured displacements are applicable in the stress-strain analysis of the boundary and the adjacent rock mass in elasticity and inelasticity, plasticity and in post-limiting deformation.

Key words: displacements, underground opening, physical model, borehole stress-relief method, functional dependence, polar angle, prediction, stress state.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-17-00188.

For citation: Chanyshv A. I., Abdulin I. M. Determining displacements of boundary of underground openings after drivage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10):20-30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_20.

Введение

Для оценки состояния массива пород применяются решения краевых задач в различных постановках [1–3]. Классическими являются первая краевая задача, когда на границах задаются векторы напряжений Коши, вторая краевая задача, предполагающая задание на границах векторов перемещений, третья краевая задача (смешанная), связанная с тем, что на части границы задаются векторы напряжения Коши, на другой — вектор перемещений [4–6]. Говоря о второй и третьей задачах, следует подчеркнуть, что здесь требуется знать, на границе или на ее части вектор перемещений. Однако этот вектор в горном деле остается неизвестным, потому что информация о нем исчезает вместе с образованием выработки (процессы исчезновения информации и образования контура происходят одновременно). Второй момент, на который следует обратить внимание, — структура массива породы за контуром выработки. Здесь также из-за невозмож-

ности проникнуть внутрь массива пород нет никакой информации о наличии в нем отверстий, включений, геометрии, расположения, условий нагружения. Если говорить про бесконечно удаленные точки, участвующие в расчетах напряженно-деформированного состояния по классическим схемам, то кроме гипотез об однородном или линейном характере распределения напряжений и смещений на «бесконечности» других гипотез нет [7–9].

Все упирается в контур выработки. В простейшем случае он свободен от напряжений. И если удастся по каким-то причинам определить на этом контуре смещения, которые уже произошли, то получается переопределенная с точки зрения классики задача, позволяющая найти информацию о структуре массива пород вблизи исследуемого контура выработки, а также определить напряженно-деформированное состояние вокруг выработки с прогнозом возможного разрушения и, более того, указать

условия нагружения массива пород в бесконечно удаленных точках. Таким образом, задача заключается в определении смещений контура выработки, когда они уже произошли в момент ее создания. Из известных способов [10–12] наиболее достоверным является тот, что основан на изготовлении макета выработки и помещении его в реальные условия нагружения. Однако этот путь исключается в силу невозможности создания макета всей выработки с сохранением всех условий нагружения. Поэтому рассматриваются лишь сечения реальных выработок с повтором их при моделировании [13–15]. То есть выбирается в массиве пород некоторое пространство в виде плоской поверхности, на которой изображается сечение выработки. Затем это сечение с помощью щелеобразователей освобождается от напряжений, и тогда в этот момент возможно проконтролировать появление смещений контура макета выработки. С применением методов геометрического подобия таким образом находятся смещения сечения контура самой выработки. Рассматривая различные сечения выработки с сохранением положений действующих в массиве нагрузок, можно найти полную

информацию о смещениях границ всей выработки.

Предложенная методика определения смещений на поверхности массива пород с выработкой эллиптической формы может быть распространена вглубь массива пород с высверливанием отверстий на глубину и расположением в них реперных элементов, выходящих своими концами на поверхность. При этом реперные элементы (стержни) не должны касаться стенок отверстий, так чтобы можно было рассматривать относительные смещения реперных стержней на заданной глубине. По концам реперных элементов в момент образования эллиптической щели можно судить о выполнимости, например, на этой глубине условия плоской деформации.

В работе рассматриваются выработки эллиптической формы. Крайними положениями их являются цилиндрическая выработка с круговым сечением и выработка в виде прямолинейной щели (трещина). Если на краях прямолинейной щели по указанной выше методике возможно установить смещения берегов, то это означает, что с помощью этих смещений возможно определить состояние массива пород в ее окрестности.

Для формулировки граничных условий задачи привлекаются два равновесных состояния массива пород в разные моменты времени. Первый момент связан с тем, что на поверхности намечается контур создаваемой выработки, фиксируются положения реперных точек вблизи него. Второй момент связан с образованием криволинейной щели, когда создается контур выработки, свободный от напряжений, вычисляются при этом перемещения точек, зафиксированных в первый момент времени. Как итог получается контур отверстия (выработки), свободный от напряжений, на котором имеются заданные смещения (радиальные и тангенциальные).

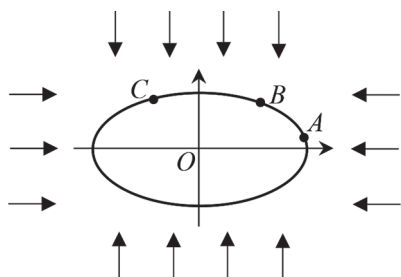


Рис. 1. Система действующих сжимающих сил в массиве горных пород. На заранее подготовленную поверхность наносится изображение сечения контура выработки в виде эллипса. Далее этот контур освобождается от напряжений

Fig. 1. Effective compressive forces in rock mass. Cross-section of underground opening in the form of an ellipse is plotted on a prepared surface. The boundary of the underground opening is made stress-free

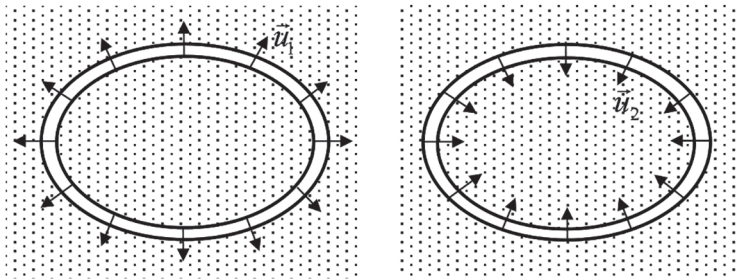


Рис. 2. Два вида смещений, образуемых при создании криволинейной (эллиптической) щели: \vec{u}_1 — смещения ядра эллиптической формы, направленные наружу; \vec{u}_2 — смещения массива пород с эллиптическим отверстием, направленные вовнутрь

Fig. 2. Two type of displacements in formation of a curved (elliptical) opening: \vec{u}_1 — displacements of elliptical core, directed outward, \vec{u}_2 — displacement of rock mass with an elliptical hole, directed inward

Определение смещений контура образующегося ядра эллиптической формы и выработки в массиве пород при щелевой разгрузке по данным измерений расстояний между точками

В качестве примера определения смещений контура выработки рассмотрим выработку с эллиптическим сечением. На рис. 1 представлена плоскость xOy как плоскость обнажения массива горных пород (выработка простирается перпендикулярно этой плоскости).

На поверхности изображается сечение контура выработки, которое затем с помощью щелеобразователей освобождается от напряжений при движении от точки A и далее до точек B , C и т.п. При образовании щели происходит «распружинивание» материала с двух ее сторон, так, как показано на рис. 2.

Образуются два вида смещений: \vec{u}_1 характеризуют нагруженность самого массива пород, смещения \vec{u}_2 возникают за счет образования выработки эллиптической формы в нагруженном массиве пород.

Замечание. Для создания эллиптической щели в массиве горных пород возможно использовать твердосплавные фрезы (сверла), движущиеся своей боковой

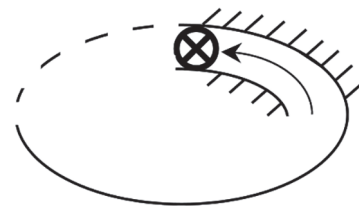


Рис. 3. Схема создания эллиптической щели в массиве горных пород

Fig. 3. Creation of elliptical hole in rock mass

гранью вдоль намеченного контура, как на рис. 3.

Для определения смещений контура выработки с эллиптическим сечением введем полярную систему координат, связанную с центром O (предполагаем, что он неподвижен), так, как изображено на рис. 4.

Предполагается, что контур выработки расположен симметрично по отношению к действующим на массив нагрузкам. Это означает, что смещения точек A_1, B_1, C_1, D_1 и A_2, B_2, C_2, D_2 должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} u_r &= A + B \cos 2\theta + C \cos 4\theta, \\ u_\theta &= D \sin 2\theta + E \sin 4\theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где θ — полярный угол; A, B, C, D, E — константы.

Задача — найти значения этих коэффициентов в данных уравнениях по из-

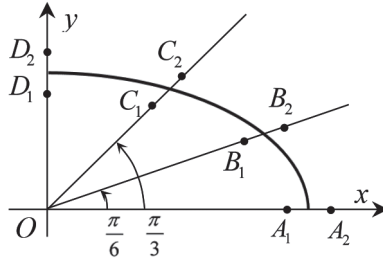


Рис. 4. Сечение выработки в виде эллипса: точки A_1, B_1, C_1, D_1 , как и точки A_2, B_2, C_2, D_2 , лежат на подобных эллипсах. Первые находятся внутри образуемой эллиптической щели, вторые — снаружи
 Fig. 4. Cross-section of underground opening in the form of an ellipse: the points A_1, B_1, C_1, D_1 and A_2, B_2, C_2, D_2 belong to the similar ellipses inside and outside of the elliptical hole, respectively

меренным смещениям. Лучи, вдоль которых производятся измерения радиальных смещений, образуют с осью абсцисс соответственно углы: $\theta = 0, \pi/6, \pi/3, \pi/2$.

Рассмотрим момент образования эллиптической щели. В результате разгрузки точки A_1, B_1, C_1, D_1 получают смещения, направленные от центра O . Обозначим их соответственно $u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}, u_{r4}$. Для определения констант A, B, C получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} u_{r1} = A + B + C, \\ u_{r2} = A + \frac{B}{2} - \frac{C}{2}, \\ u_{r3} = A - \frac{B}{2} - \frac{C}{2}, \\ u_{r4} = A - B + C. \end{cases} \quad (2)$$

Из первых трех уравнений находим константы

$$\begin{aligned} A &= \frac{u_{r1} + 2u_{r3}}{3}, \quad B = u_{r2} - u_{r3}, \\ C &= \frac{2}{3}u_{r1} - u_{r2} + \frac{1}{3}u_{r3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Последнее уравнение из системы уравнений (2) является проверочным. Согласно ему должно быть

$$\frac{u_{r4} - u_{r1}}{2} = u_{r3} - u_{r2}. \quad (4)$$

Другими словами, разность значений радиальных смещений в точках A_1, D_1 должна совпадать с удвоенной раз-

стью радиальных смещений в точках B_1, C_1 на рис. 4. Если это так, то тогда выбор функций смещений в виде (1) оправдан.

Определим теперь тангенциальные смещения u_θ в точках B_1 и C_1 . Для этого есть два пути. Первый путь заключается в применении фотографических систем, быть может, видеокамеры [16–18]. Другой путь, приближенный к реальным условиям добычи полезных ископаемых, состоит в измерении с помощью измерительных устройств (штангенциркуль, микрометр и др. [16]) расстояний между точками A_1, B_1 , точками A_1, C_1 как до образования эллиптической щели, так и после (то же самое касается точек A_2, B_2 и A_2, C_2 на рис. 4. Разности этих расстояний до образования щели и после свяжем со смещениями u_θ из (1). Если обозначить тангенциальное смещение u_θ точки B_1 как $u_{\theta 2}$, а смещение u_θ точки C_1 как $u_{\theta 3}$, то для определения констант D, E в (1) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} (D + E) \frac{\sqrt{3}}{2} = u_{\theta 2}, \\ (D - E) \frac{\sqrt{3}}{2} = u_{\theta 3}. \end{cases}$$

Из нее следует

$$D = \frac{u_{\theta 2} + u_{\theta 3}}{\sqrt{3}}, \quad E = \frac{u_{\theta 2} - u_{\theta 3}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Осталось определить смещения u_{02} , u_{03} через приращения расстояний A_1B_1 , A_1C_1 . Обозначим первое приращение как Δ_2 , второе как Δ_3 . Для их определения воспользуемся тем, что точки A_1, B_1, C_1, D_1 (точки A_2, B_2, C_2, D_2) лежат на подобных эллипсах. Пусть уравнение первого эллипса, проходящего через точки A_1, B_1, C_1, D_1

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (6)$$

где a, b – полуоси эллипса.

Введя полярные координаты r, θ имеем

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta.$$

Уравнение (6) в полярных координатах сводится к следующему:

$$r = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta}}.$$

Полярный радиус для точки A_1 равен $r_{A_1} = a$, для точки B_1 $r_{B_1} = 2ab / \sqrt{a^2 + 3b^2}$, для точки C_1 ($\theta = \pi/3$) значение $r_{C_1} = 2ab / \sqrt{3a^2 + b^2}$.

Составляем вектор $\overline{A_1B_1}$ до образования щели и после. До образования щели точка A_1 по осям абсцисс и ординат имела следующие координаты: $A_1 = A_1(a, 0)$, точка $B_1 = B_1(r_{B_1} \sqrt{3}/2, r_{B_1}/2)$.

Вектор $\overline{A_1B_1}$ при этом равен $\overline{A_1B_1} = B_1 \left(r_{B_1} \frac{\sqrt{3}}{2} - a, r_{B_1} \frac{1}{2} \right)$, длина которого есть

$$|\overline{A_1B_1}| = \sqrt{\left(r_{B_1} \frac{\sqrt{3}}{2} - a \right)^2 - r_{B_1}^2 \frac{1}{4}}.$$

После образования щели точка A_1 примет координаты $\tilde{A}_1(a + u_{r1}, u_{01})$, точка B_1 превратится в точку $\tilde{B}_1 \left((r_{B_1} + u_{r2}) \frac{\sqrt{3}}{2} - u_{02} \frac{1}{2}, (r_{B_1} + u_{r2}) \frac{1}{2} + u_{02} \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$.

Про величину u_{01} (тангенциальное смещение точки A_1 на рис. 4) считаем, что оно в силу симметрии равно нулю. Далее составляется приращение длины вектора $\overline{A_1B_1}$. Находим

$$\Delta_2 = \sqrt{\left((r_{B_1} + u_{r2}) \frac{\sqrt{3}}{2} - u_{02} \frac{1}{2} - a - u_{r1} \right)^2 - \left((r_{B_1} + u_{r2}) \frac{1}{2} + u_{02} \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} - |\overline{A_1B_1}|.$$

Чтобы избавиться от радикала, в этом месте умножим полученное выражение и разделим на сопряженное. После пренебрежения квадратами и произведениями малых величин u_{02}, u_{r1}, u_{r2} получаем

$$\Delta_2 = \frac{(r_{B_1} + a)(u_{r2} - u_{r1}) + au_{02} / 2}{|\overline{A_1B_1}|},$$

откуда

$$u_{02} = \left(|\overline{A_1B_1}| \Delta_2 - (r_{B_1} + a)(u_{r2} - u_{r1}) \right) \frac{2}{a}. \quad (7)$$

Аналогично находим

$$u_{03} = \left(|A_1 C_1| \Delta_3 - (a - r_{C_1} / 2) u_{r_1} - (r_{C_1} - a / 2) u_{r_3} \right) \frac{1}{\sqrt{3a}}. \quad (8)$$

Зная (7), (8), по (5) восстанавливаем коэффициенты D и E в (1) для разложения функции в ряд по тригонометрическим функциям $\sin 2\theta$, $\sin 4\theta$.

Точно так же находим разложения функций u_r , u_θ по тригонометрическим функциям $\cos 2\theta$, $\cos 4\theta$, $\sin 2\theta$, $\sin 4\theta$ на эллипсе, расположенном за границей щели, проходящем через точки A_2 , B_2 , C_2 , D_2 на рис. 4.

Если обозначить коэффициенты разложений u_r , u_θ как A_0 , B_0 , ..., E_0 , то в дополнение к (1) получаем

$$\begin{aligned} u_{r,0} &= A_0 + B_0 \cos 2\theta + C_0 \cos 4\theta, \\ u_{\theta,0} &= D_0 \sin 2\theta + E_0 \sin 4\theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Полные смещения u_r , u_θ на границе выработки с эллиптическим отверстием в условиях симметричного нагружения будут равны разности функций (9) и (1), взятых с поправочными коэффициентами. Коэффициенты возникают из-за того, что точки A_1 , B_1 , C_1 , D_1 и точки A_2 , B_2 ,

C_2 , D_2 на рис. 4 находятся не на щели, а на подобных эллипсах с разными значениями полуосей. Требуется привести значения смещений к одному знаменателю с соблюдением законов геометрического подобия.

Сделаем ряд замечаний.

1. Вид разложения функций u_r , u_θ по тригонометрическим функциям (косинусы, синусы) в виде, например, (1) не зависит от того, каково сечение выработки (круговое, эллиптическое, трапециевидное). Для керна, как и для контура макета образуемой выработки, оно зависит от условия нагружения массива пород в бесконечно удаленных точках, от наличия в нем до образования исходной выработки других выработок и жестких включений. В общем случае разложения функций u_r , u_θ в ряды Фурье имеют вид [4]:

$$u_r + iu_\theta = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} A_k e^{ik\theta},$$

где A_k — комплексные постоянные.

2. Чтобы определиться с характером этих разложений, проще всего исследовать круговую цилиндрическую щель, рассмотреть характер изменения радиальных и тангенциальных смещений от

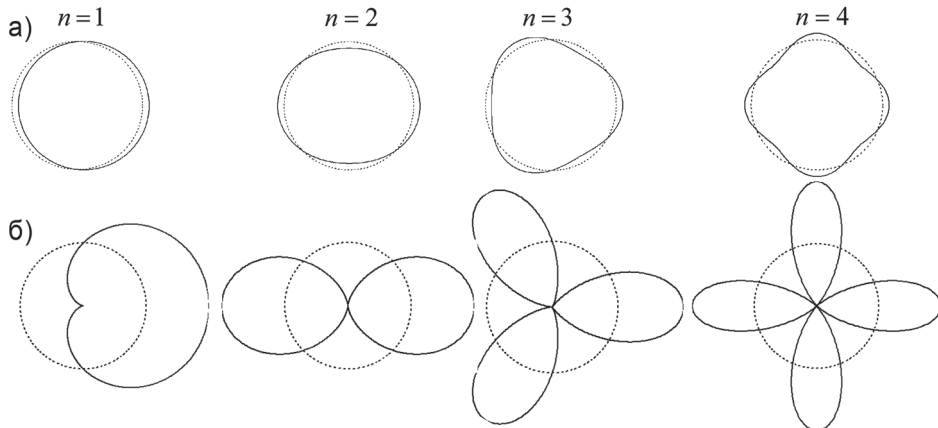


Рис. 5. Графики изменений контура выработки с учетом радиального смещения, изменяющегося по закону $u_r = A \cos(n\theta)$, $A = 0,1$, $n = 1, 2, 3, 4$

Fig. 5. Change in the boundary of underground opening with regard to the radial displacement in accordance with the law $u_r = A \cos(n\theta)$, $A = 0,1$, $n = 1, 2, 3, 4$

угла θ . Далее выбрать соответствующую функцию разложения и ею воспользоваться для аппроксимации смещений вокруг выработки произвольной формы.

На рис. 5, а в качестве иллюстрации приведены графики изменений функции u_r в зависимости от угла θ для выработки с начальным круговым сечением для простейших случаев разложений $u_r = A \cos(n\theta)$, где A — константа. При $n = 1$ происходит сдвиг центра выработки вправо, при $n = 2$ выработка расширяется в горизонтальном и сужается в вертикальном направлениях. При $n = 3$ контур выработки разбивается на три равные части. Одни части уходят наружу, другие внутрь. При $n = 4$ ситуация аналогична.

На рис. 5, б представлены зависимости $r = 1 + 0,1 \cos(n\theta)$ для тех же самых случаев изменения n . При $n = 1$ получаем кардиоиду, при $n = 2$ двулепестковую розу, при $n = 3$ трехлепестковую, при $n = 4$ четырехлепестковую.

Полученные значения смещений на контуре выработки, свободной от напряжений или нагруженной усилиями, позво-

ляют определять напряженное состояние самого контура выработки и в ее окрестности не только в состоянии упругости, но и в пластичности (состоянии предельного деформирования) [19, 20]. Они служат для оценки точности решения задач в указанных областях с применением различных вычислительных программ и расчетных схем. Их применение может создать условия для прогноза и предотвращения всевозможных катастрофических событий типа горных ударов.

Заключение

1. Показано, что для определения полных смещений контура выработки в случае, когда они уже произошли в момент ее создания, необходимо произвести криволинейную щель, повторяющую контур выработки. При этом измерить смещение как границы керна, так и образующегося отверстия. После сложить эти смещения соответствующим образом.

2. Показано, как по данным точечных измерений (измерение расстояний между точками) возможно восстановить функцию смещений на границе выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картозия Б. А. Традиционная инженерная задача геомеханики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 1. — С. 236–245.
2. Kozyrev A., Kasparian E., Rozanov I. The integrated geodetic monitoring system of open pit slopes in hard rock massifs // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 192, no. 56, article 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201015.
3. Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Рассказов И. Ю., Ткач С. М. О комплексном освоении недр и территорий в сложных природно-климатических условиях // Горный журнал. — 2019. — № 6. — С. 84–89. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.12.
4. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 708 с.
5. Goodier J. N., Hodge Jr. P. G. Elasticity and plasticity: The mathematical theory of elasticity and the mathematical theory of plasticity, courier dover publications. 2016, 160 p.
6. Lei J., Ding P., Zhang C. Boundary element analysis of static plane problems in size-dependent consistent couple stress elasticity // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2021, vol. 132, pp. 399–415. DOI: 10.1016/j.enganabound.2021.08.014.
7. Браговский Б. В., Кайдо И. И. Определение параметров горного давления с помощью интеграционной палетки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S44. — С. 14–24. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-44-14-24.

8. Wu Y., Gao Y. Gravity pattern in southeast margin of Tibetan Plateau and its implications to tectonics and large earthquakes // *Earth and Planetary Physics*. 2019, vol. 3, no. 5, pp. 425–434. DOI: 10.26464/epp2019044.

9. Ebbing J., Haas P., Ferraccioli F., Pappa F., Szwillus W., Bouman J. Earth tectonics as seen by GOCE-Enhanced satellite gravity gradient imaging // *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, no. 1, article 16356. DOI: 10.1038/s41598-018-34733-9.

10. Kong F., Lu D., Du X., Shen C. Displacement analytical prediction of shallow tunnel based on unified displacement function under slope boundary // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019, vol. 43, no. 1, pp. 183–211. DOI: 10.1002/nag.2859.

11. Yi G., Kim N. H. Identifying boundaries of topology optimization results using basic parametric features // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017, vol. 55, no. 5, pp. 1641–1654. DOI: 10.1007/s00158-016-1597-9.

12. Шкуратник В. Л., Новиков Е. А. Термостимулированная акустическая эмиссия горных пород как перспективный инструмент решения задач геоконтроля // *Горный журнал*. – 2017. – № 6. – С. 21–27.

13. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. – М.: Недра, 1994. – С. 15–19.

14. Раимжанов Б. Р., Хасанов А. Р., Фарманов О. Э. Исследование геодинамического состояния массива горных пород с целью прогнозирования горных ударов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 10. – С. 29–41. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.

15. Асанов В. А., Токсаров В. Н., Самоделкина Н. А., Бельтюков Н. Л., Ударцев А. А. Оценка напряженно-деформированного состояния нетронутого массива на месторождении «Жаман-Айбат» // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2014. – № 12. – С. 56–66. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.7.

16. Феклистов Ю. Г. Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // *Проблемы недропользования*. – 2017. – № 4(15). – С. 28–32. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.028.

17. Феклистов Ю. Г., Зубков А. В., Криницын Р. В. Контроль напряженного состояния горных и строительных объектов полярископом ПШК-С // *Безопасность труда в промышленности*. – 2017. – № 12. – С. 22–26. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-12-22-26.

18. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Липин Я. И., Худяков С. В., Криницын Р. В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // *Проблемы недропользования*. – 2016. – № 4(11). – С. 41–49. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.041.

19. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Определение напряженно-деформированного состояния горных пород по данным измерений на контуре выработки вектора напряжений Коши и вектора смещений // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2021. – № 1. – С. 13–20. DOI: 10.15372/FTPRPI20210102.

20. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Новые постановки задач геомеханики с учетом запрещенного деформирования горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2022. – № 5. – С. 12–27. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220502. **MIAB**

REFERENCES

1. Kartoziya B. A. Traditional engineering problem geomechanics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 1, pp. 236–245. [In Russ].

2. Kozyrev A., Kasparian E., Rozanov I. The integrated geodetic monitoring system of open pit slopes in hard rock massifs. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, no. 56, article 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201015.

3. Yakovlev V. L., Kornilkov S. V., Rasskazov I. Y., Tkach S. M. Integrated subsoil use and territorial development in difficult natural environments and adverse climatic conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 6, pp. 84–89. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.12.
4. Muskhelishvili N. I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity], Moscow, Nauka, 1966, 708 p.
5. Goodier J. N., Hodge Jr. P. G. *Elasticity and plasticity: The mathematical theory of elasticity and the mathematical theory of plasticity*, Courier Dover Publications. 2016, 160 p.
6. Lei J., Ding P., Zhang C. Boundary element analysis of static plane problems in size-dependent consistent couple stress elasticity. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021, vol. 132, pp. 399–415. DOI: 10.1016/j.enganabound.2021.08.014.
7. Bragovsky B. V., Kaydo I. I. Determination of mining pressure parameters with the help of integration stick. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S44, pp. 14–24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-44-14-24.
8. Wu Y., Gao Y. Gravity pattern in southeast margin of Tibetan Plateau and its implications to tectonics and large earthquakes. *Earth and Planetary Physics*. 2019, vol. 3, no. 5, pp. 425–434. DOI: 10.26464/epp2019044.
9. Ebbing J., Haas P., Ferraccioli F., Pappa F., Szwillus W., Bouman J. Earth tectonics as seen by GOCE-Enhanced satellite gravity gradient imaging. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, no. 1, article 16356. DOI: 10.1038/s41598-018-34733-9.
10. Kong F., Lu D., Du X., Shen C. Displacement analytical prediction of shallow tunnel based on unified displacement function under slope boundary. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019, vol. 43, no. 1, pp. 183–211. DOI: 10.1002/nag.2859.
11. Yi G., Kim N. H. Identifying boundaries of topology optimization results using basic parametric features. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017, vol. 55, no. 5, pp. 1641–1654. DOI: 10.1007/s00158-016-1597-9.
12. Shkuratnik V. L., Novikov E. A. Thermally stimulated acoustic emission of rocks as a promising tool for solving problems of geocontrol. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 6, pp. 21–27. [In Russ].
13. Vlokh N. P. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh* [Management of rock pressure in underground mines], Moscow, Nedra, 1994, pp. 15–19.
14. Raimjanov B. R., Khasanov A. R., Farmanov O. E. Analysis of geodynamic behavior of rock mass for the purpose of rock burst prediction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 29–41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.
15. Asanov V. A., Toksarov V. N., Samodelkina N. A., Beltyukov N. L., Udartsev A. A. Evaluation of the stress-strain state of the intact massif at the Zhaman-Aibat deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2014, no. 12, pp. 56–66. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.7.
16. Feklistov Yu. G. Deformation method for the complex determination of the stress state and elastic characteristics of mining and construction objects. *Problems of Subsoil Use*. 2017, no. 4(15), pp. 28–32. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.028.
17. Feklistov Yu. G., Zubkov A. V., Krinitsyn R. V. Control of the stress state of mining and construction objects with a PSHK-S polariscope. *Occupational Safety in Industry*. 2017, no. 12, pp. 22–26. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-12-22-26.
18. Zubkov A. V., Feklistov Yu. G., Lipin Ya. I., Khudyakov S. V., Krinitsyn R. V. Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsoil use objects. *Problems of Subsoil Use*. 2016, no. 4(11), pp. 41–49. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.041.
19. Chanyshev A. I., Abdulin I. M. Stress-strain behavior of rocks from the measurements of vectors of the Cauchy stresses and displacements at the boundary of an underground excavation. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 1, pp. 13–20. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20210102.

20. Chanyshv A. I., Abdulin I. M. New formulations of geomechanical problems with regard to post-limit deformation of rocks. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 5, pp. 12–27. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220502.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чанышев Анвар Исмагилович¹ — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный университет экономики и управления, e-mail: a.i.chanyshv@gmail.com,

Абдулин Ильгизар Маратович¹ — научный сотрудник,
¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

Для контактов: Чанышев А.И., e-mail: a.i.chanyshv@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Chanyshv¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Chief Researcher; Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Novosibirsk, Russia, e-mail: a.i.chanyshv@gmail.com,

I.M. Abdulin¹, Researcher,
¹ Chinakal Institute of Mining Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: A.I. Chanyshv, e-mail: a.i.chanyshv@gmail.com.

Получена редакцией 31.03.2023; получена после рецензии 07.06.2023; принята к печати 10.09.2023.
Received by the editors 31.03.2023; received after the review 07.06.2023; accepted for printing 10.09.2023.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Куппнев В.А., Шумилова Л.В.

Промышленные приборы в новом конструктивном и технологическом оформлении для эффективной разработки россыпных месторождений

Год: 2023

Страниц: 256

ISBN: 978-5-98672-570-3

UDK: 622.271.1

В монографии рассматриваются разработанные промышленные приборы (модульные передвижные промышленные установки) 1-го, 2-го, 3-го и 4-го типоразмеров в новом конструктивном и технологическом оформлении с механическим и гидравлическим способом подачи песков с целью повышения извлечения золота, экономической эффективности и экологической безопасности освоения целиковых, техногенных и чрезвычайно сложных валунистых россыпных месторождений золота. Предложены новые технологические схемы гравитационного гидравлического обогащения песков.