УДК 622.831

А.Н. Шашенко, А.В. Смирнов, Н.В. Хозяйкина

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

Представлен обзор методологий, позволяющий выполнять прогноз величины коэффициента бокового давления. На примере условий шахты «Степная» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь» выполнен численный эксперимент устойчивости одиночной горизонтальной подземной выработки в программном комплексе RS2 канадской компании Rockscience. результаты численного эксперимента подтверждают, что размер зоны разрушения, и перемещение контура выработки существенно зависит от характера распределения начального поля напряжений. В соответствии с аналитическими исследованиями коэффициент бокового распора может изменяться от величины меньшей единицы, определяемой (А.Н. Динник) до единицы в случае гидростатического распределения напряжений (А. Гейм). Натурные исследования показывают, что коэффициент бокового давления может быть, как меньше единицы, так и существенно больше. Известен и лабораторный метод определения коэффициента бокового давления основанный на том что зерна кварца в шлифах привязанных к месту отбора с особенностями природного поля напряжений. Таким образом, в настоящий момент имеется методология, позволяющая достаточно уверенно выполнять прогноз величины коэффициента бокового давления.

Ключевые слова: начальное поле напряжений, коэффициент бокового давления, породный массив, устойчивость подземных выработок, методология.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-37-49

Численный эксперимент

Влияние коэффициента бокового распора на размер зоны неупругих деформаций и перемещения контура одиночной выработки. С целью установления степени влияния коэффициента бокового распора на размер зоны неупругих деформаций (ЗНД) и перемещения контура одиночной выработки выполнен численный эксперимент. Задача решена на основе метода конечных элементов, который реализован в программном продукте «RS2» канадской компании Rockscience. Исследования выполнены для горно-геологических условий шахт «Степная» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь». Влияние величины коэффициента бокового распора λ исследовалось применительно к круглой выработке, которая размещена в однородной породной среде на глубине 600 м. Величина коэффициента λ варьировалась от 0,25 до 2.

Анализ полученных результатов показал, что конфигурация ЗНД, которая охватывает выработку, искажается с изменением величины коэффициента λ, принимая форму от вытянутой вдоль горизонтальной оси при λ = 0,25 до вытянутой по вертикали при λ = 2,0 (рис. 1).

Зависимость величины перемещения контура выработки *U* от величины λ показаны на графике рис. 2.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 37–49.
© А.Н. Шашенко, А.В. Смирнов, Н.В. Хозяйкина. 2017.

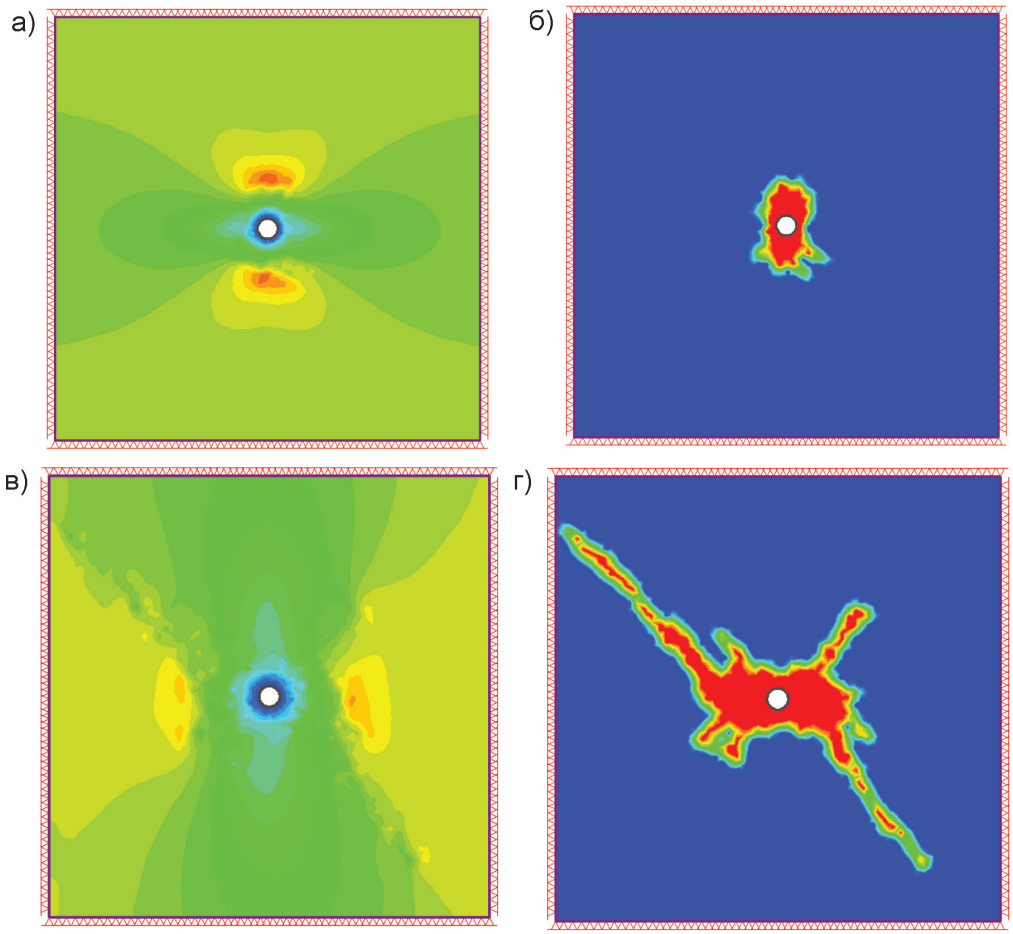

Рис. 1. Качественные картины влияния коэффициента бокового распора на размер зоны неупругих деформаций вокруг горизонтальной выработки в однородном породном массиве: картина распределений главных напряжений (σ_1) при λ = 0,25 (а); картина распределений эквивалентных напряжений ($\sigma_{экв}$), конфигурация ЗНД λ = 0,25 (б); картина распределений главных напряжений (σ_1) при λ = 2,0 (в); картина распределений эквивалентных напряжений ($\sigma_{экв}$), конфигурация ЗНД λ = 2,0 (г)

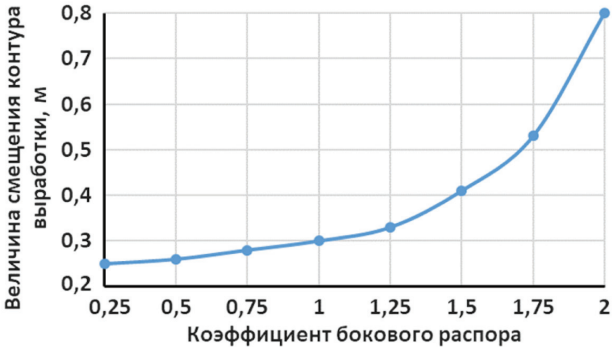

Рис. 2. Изменение величины смещения контура выработки от коэффициента бокового распора

Результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что коэффициент бокового распора существенно влияет на величину смещения контура выработки и на размеры зоны неупругих деформаций, которая формируется вокруг выработки. При этом в диапазоне величины λ от 0,25 до 1 величины смещения контура выработки изменяются слабо, а в диапазоне от 1 до 2 происходит их резкое возрастание. В этой связи представляется интересным и целесообразным рассмотреть аналитические и экспериментальные способы определения величины коэффициента бокового распора.

Аналитические исследования

До начала горных работ на месторождении породный массив уже находится в начальном (природном) напряженном состоянии, от параметров которого зависит характер проявлений горного давления: их формы места локации масштабы. Источником природных напряжений являются силы собственного веса пород и тектонические процессы в земной коре. Напряжения, возникающие в массиве горных пород от сил собственного веса определить достаточно просто. Для оценки же напряжений, которые создаются в массиве тектоническими процессами необходимо проведение специальных экспериментов.

Существует много предположений, служащих основанием для определения компонентов начального поля напряжения. Наибольшее распространение получила гипотеза А.Н. Динника [1], суть которой заключается в следующем.

Напряженное состояние считается установленным, если известны его компоненты в каждой точке исследуемой области. Для объемного напряженного состояния, в котором находится любая точка породного массива, справедливы соотношения обобщенного закона Гука, в соответствии с которым горизонтальная деформация определится выражением

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right], \qquad (1)$$

где E, μ — соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона горных пород.

В соответствии с гипотезой А.Н. Динника полагают, что в условиях стесненного сжатия горизонтальные деформации ε_x равны нулю. Исходя из этого, получим

$$\sigma_x - \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right) = 0. \qquad (2)$$

Поскольку оси координат выбираются произвольно, то для однородного изотропного массива можно положить что $\varepsilon_x = \varepsilon_z$ и $\sigma_x = \sigma_z$ а $\sigma_y = \gamma H$. Тогда, на основе выражения (2) получим следующую зависимость

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu}\gamma H. \qquad (3)$$

Таким образом, напряженное состояние нетронутого массива определено. Из (3) следует, что в упругом массиве горизонтальные и вертикальные напряжения связаны соотношением:

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda\gamma H, \text{ где } \lambda = \frac{\mu}{1-\mu}.$$

Сложность задачи адекватного определения коэффициента бокового распора определяется многочисленностью факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние земной коры, степень и характер влияния которых изучены недостаточно, а многозначность решений следует уже из того, что в силу внутренних и внешних воздействий земная кора подвержена постоянным деформациям и в ней всегда имеются остаточные напряжения.

По теории А.Н. Динника [1] после перехода пород в пластичное состояние действующие в массиве природные горизонтальные напряжения становятся равными вертикальным, то есть во всех направлениях давление в массиве одинаково и равно γH, и $\lambda = 1$. В таких слу-

чаях говорят о гидростатическом распределении природных напряжений в пластичных массивах. Гипотеза о гидростатическом распределении напряжений впервые была высказана А. Геймом. Инструментальные измерения, выполненные ВНИМИ применительно к условиям пологозалегающих месторождений осадочного происхождения, подтвердили эту гипотезу [2].

Таким образом, можно полагать, что на равнинных месторождениях при отсутствии влияния неотектонических процессов напряженное состояние близко к гидростатическому. В других же случаях оно является неравнокомпонентным, причем соотношение между горизонтальной и вертикальной составляющими могут быть как больше, так и меньше единицы.

Выше были рассмотрены простые, частные случаи распределения начальных компонент напряжений в нетронутом породном массиве, вызванных только действием собственного веса пород.

Полная же задача о естественном напряженном состоянии породного массива чрезвычайно сложна, а решения ее — многозначны. Эту многозначность С.Г. Михлин [3] выразил уравнением

$$\sigma_x = a\sigma_z + b, \qquad (4)$$

где σ_x и σ_z — соответственно тангенциальная (горизонтальная) и радиальная компоненты напряжений; *a, b* — произвольные постоянные (не имеющая размерности — *a* и имеющая размерность напряжений — *b*).

При этом согласно предположению о гидростатическом распределении напряжений $a = 1$, $b = 0$, $\sigma_z = \gamma z$, а согласно предположению о негидростатическом

$$a = \frac{\mu}{1-\mu}, \; b = 0, \; \sigma_z = \gamma z$$

С.А. Христианович на основе исследований механизма гидроразрыва пластов в 1960 г. впервые указал на несоответствие распространенных тогда в геомеханике представлений о напряженном состоянии не тронутого горными работами массива фактическому полю напряжении [4].

Известны и теоретические исследования в этой области. Так, в работе [5] на основе метода дискретных элемен-

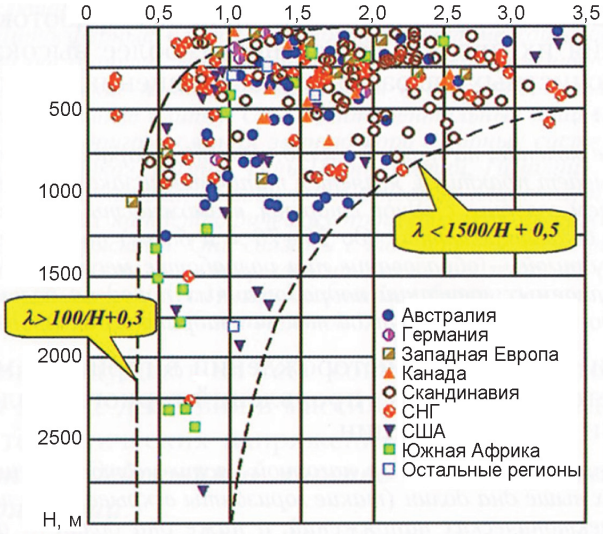

Рис. 3. Изменение с глубиной соотношения средних горизонтальных тектонических и вертикальных напряжений [17]

тов проведено численное моделирование процесса деформирования сыпучей среды в трехмерной постановке в случае больших деформаций для двух предельных значений угла внешнего трения φ между частицами ($\varphi = 0°$ и $\varphi = 45°$).

Продемонстрировано выполнение соотношения континуальной модели Друкера–Прагера на начальной стадии нагружения при отсутствии трения между дискретными элементами.

Показано, что с увеличением давления коэффициент бокового распора переходит в некоторое стационарное состояние.

В работе [6] на основе анализа вязких свойств получено выражение для бокового распора в массиве горных пород с учетом упругих и вязкоупругих деформаций пород. В пределах глубин инженерной деятельности в неоднородном массиве пород со слоями, имеющими различные вязкие свойства, боковой распор меняется скачками от слоя к слою. Этим автор объясняет, например, то, что в водоносных или нефтеносных породах коллекторские свойства сохраняются на больших глубинах (1 км и более). При этом в соляных или глинистых слоях напряженное состояние близко к гидростатическому в силу их вязкоупругих свойств. В большинстве же случаев не возникают условия предельного напряженного состояния, влияющие на формирование напряжений бокового распора в массиве пород.

Результаты натурных измерений величины коэффициента бокового распора

В СССР была проведена огромная работа по совершенствованию методов и средств изучения напряженного состояния земной коры: в горных выработках — методами разгрузки, в геологических структурах — методами восстановления полей напряжений по элементам залегания трещин и разломов, в очагах землетрясений — по данным сейсмических наблюдений, в сейсмоактивных регионах страны — по данным новейших и современных движений земной коры. Во многих районах страны (Кольский полуостров, Кривой Рог, Донбасс, Урал, Норильск, Кузбасс, Алтай, Средняя Азия и др.) Проведено качественное и количественное сравнение полей напряжений, полученных разными методами. Результаты этих исследований нашли отражение в ряде работ [7—16].

Одновременно обширные исследования естественных полей напряжений были выполнены зарубежными учеными в Австрии, Норвегии, Швеции, Финляндии, Канаде, США, ЮАР и в других странах [15]. Они представлены на рис. 3.

Накопленные за последние 10 лет статистические материалы о естественном поле напряжений подтверждают основные статистические особенности в распределении напряжений в верхней части земной коры [15]:

- гипотезе о гидростатическом напряженном состоянии нетронутого массива пород соответствуют менее 25% всех измерений;
- гипотезе А.Н. Динника верна, примерно, для 25% всех измерений (включая и случаи с $\mu = 0{,}5$);
- около 75% всех измерений дают неравные горизонтальные напряжения и отношение σ_x/σ_y достигает порядка 5—6 и более;
- свыше 75% всех измерений свидетельствуют о том, что горизонтальные напряжения больше вертикальных в 1,5—6 раз;
- минимальное сжимающее напряжение в 60% случаев меньше γH, что совпадает с обобщенными статистическими данными о критических давлениях при гидроразрыве пластов;
- максимальное сжимающее напряжение в 89% случаев ориентировано поч-

ти горизонтально и вкрест простирания основных геологических структур (±30°);

• вертикально ориентировано или σ_2 (~50% случаев), или σ_3 (~30%);

• ориентировки главных напряжений, найденные по данным методов разгрузки и восстановления по трещиноватости, в среднем совпадают (в пределах точности и степени локальной неоднородности полей напряжений), что свидетельствует об унаследованности полей тектонических напряжений [2].

Наличие системной трещиноватости уже само по себе не соответствует ни одной из гипотез о напряженном состоянии массива пород, построенных только на учете веса пород, а наличие планетарных систем трещин и длительная унаследованность ориентировки тектонических полей напряжений свидетельствуют о глобальных факторах, оказывающих влияние на формирование поля напряжений в земной коре.

Оценка состояния тектонических процессов на основе кристаллографического анализа

В своей работе О.С. Алфёров [18] сделал попытку воспроизвести напряженное состояние пород в различных районах Донбасса по результатам микроструктурных исследований пород по ориентированным петрографическим шлифам.

Предпосылкой для такой постановки задачи являются известные положения структурной петрологии о том, что под влиянием напряжений возникают дифференциальные движения в массиве, которые сопровождаются возникновением ориентированного расположения отдельных минералов в пространстве, особенно когда деформации носят пластический характер. Однако, для осадочных пород априори считалось, что подобные положения на них не распространяются, и по этой причине исследования для них не проводилось.

Для пород метаморфизованных микроструктурные исследования позволяют восстановить картину и характер происходивших деформаций [19, 20, 21, 22]. Представляется также возможность решить обратную задачу: по следам движений и строению деформированной породы восстановить характер напряженного состояния в массиве, результатом которого явилась деформированная структура. Основополагающим моментом при этом является известный принцип П. Кюри [23] о симметрии «причины» и симметрии «следствия» физических явлений, а также положение Б. Андера [19] о том, что «...симметрия строения деформированной породы является отображением кинематической симметрии движения при деформации».

Объектами микроструктурных исследований работы [18] являлись крупно- и среднезернистые песчаники аллювиального генезиса и частично на песчаных сланцах Красноармейского, Донецко-Макеевского, Торезского и Кадиевского районов Донбасса.

В минералогическом отношении исследованные породы довольно однообразные. Основную часть составлял обломочный кварц (до 60—80%), полевые шпаты (3—5%), обломки горных пород (1—3%), карбонаты обломочного и вторичного происхождения, слюды и глинистые минералы. По составу и типу цемента исследованы различные разновидности за исключением базального карбонатного. При микроскопическом просмотре шлифа предпочтительная ориентировка минералов ни по форме, ни по внутреннему строению не проявляется. Однако, при введении компенсационной пластинки или кварцевого клина определенное количество зерен окрашивается в одинаковые цвета интерференции, что служит предварительным признаком ориентировки.

Образцы отбирались на крыльях складок с углом падения от 3—4° до 50—

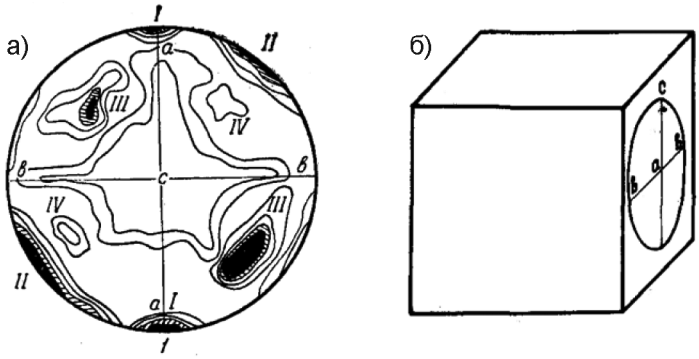

Рис. 4. Ориентирная диаграмма песчаника φ = 29°, глубина 800 м. Контуры соответствуют: /7—5/–4–3–2–1–0%. Микроструктурная диаграмма (а); положение образца в массиве (б)

60° из керна буровых скважин, либо из забоя или стенок горных выработок в шахтах.

Микроструктурные исследования выполнялись при помощи столика Федорова, методика которых описана в различных трудах и руководствах [24, 22, 20, 21]. Исследованию подвергалась кристаллическая решетка минерала кварца в обломочных зернах.

Изучалось пространственное положение оптической индикатрисы; на структурную диаграмму наносилось положение оптической оси, являющейся ее осью симметрии. Шлифы приготавливались в трех взаимно перпендикулярных направлениях в соответствии с координатными осями Б. Зандера — *a, b, c*. В полевых условиях мы принимали ориентировку плоскости *ac* — по падению, плоскости *bc* — по протиранию и плоскости *ab* — по слоистости. Шлифы, таким образом, были ориентированы в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В шлифе производилось от 200 до 300 измерений выходов оптических осей. Результаты наносились на сетку. Вульфа с последующей статистической обработкой на планисфере Пронина-Меллиса. Всего было исследовано около 50 образцов пород из различных районов.

Сущность деформационных преобразований в кристаллических решетках минералов под действием тектонических напряжений сводится к следующему. Минералы, участвующие в дифференциальных тектонических перемещениях в процессе складчатости, испытывают некоторый поворот. В момент, когда с направлением движения (деформации) совпадает одна из плоскостей трансляции в кристаллической решетке минерала, вращение зерна прекратится и начнется трансляция, т.е. симметричный сдвиг в кристаллической решетке. Трансляция кристаллической решетки — величина, строго ограниченная в линейных размерах и в направлении, соответствующем решеткам Бравэ.

На этой основе кристаллические решетки анизотропных минералов получают закономерную ориентировку в пространстве по отношению к действующим напряжениям и перемещениям, образуя, так называемую, ориентированную текстуру.

На рис. 4 представлена ориентировка оптических осей кварца в образце, взятом непосредственно из зеркала скольжения в Красноармейском районе.

Ориентировка шлифа совпадает с плоскостью *ab* = *s* = *S*. На диаграмме четко выделяются несколько максимумов концентрации оптических осей. Объяснить их ориентировку наличием только одного типа тектонитов нельзя.

Максимумы 1—1, располагающиеся по оси *a* характеризуют *S*-тектониты. Дифференциальные движения при образовании этих максимумов совершаются в кварце, как объясняет В. Шмидт по плоскости призмы $[10\bar{1}0]$ в направлении [0001], а оптические оси в этом случае совпадают с направлением движения. Максимумы II—II, по-видимому, аналогичны, но повернуты на некоторый угол по отношению к *a*. Наличие максимумов III—III и IV—IV, располагающихся перпендикулярно друг к другу, создают *B*-тектонитовые узоры. Таким образом, *B*-тектониты ориентированы в плоскости, перпендикулярной к *ab*, т.е. в плоскостях *bc* и *ac*.

Этот тип ориентировки объясняется А. Хитанен [24] следующим образом. Дифференциальные движения осуществлялись в кварце по граням призмы и параллельно *s* = *ab*, но в направлении не параллельном [0001], а по оси *b* в направлении $[2\bar{1}\bar{1}2]$. В результате этого движения оптические оси будут располагаться симметрично относительно плоскости *ac*.

Таким образом, общая деформация осуществлялась по оси *a* в прямоугольной системе координат Б. Зандера.

В общем виде структурная диаграмма породы представляет сложный сопряженный *S*+*B*–тектонит. Причем, «основным» по интенсивности проявления *S*–тектонит, «дополнительным» являются *B*–тектониты, лежащие в плоскостях, перпендикулярных слоистости пород. Для *S*–тектонита характерным является наличие одной плоскости дифференциальных перемещений, располагающейся в плоскости слоистости, т.е. в плоскости *ab* = *S*.

В то же время эта плоскость является плоскостью симметрии узора *S*–тектонита. Одновременно в двух других плоскостях [*ac* и *bc*] располагаются узоры *B*-тектонитов. Для них характерным является наличие двух плоскостей дифференциальных перемещений для каждой фигуры. В то же время эти плоскости являются плоскостями симметрии для *B*-тектонитов. Все три фигуры оказываются сопряженными и симметричными относительно оси *c*.

Таким образом, ось *c* является осью симметрии четвертого порядка. Максимумы концентрации оптических осей *S*-тектонита на периферии круга и плоскости симметрии сопряженных *B*-тектонитов являются в то же время выходами кристаллографических осей второго порядка. Всего их 4. Таким образом, имеется статистическая пространственная фигура, образованная деформированными кристаллическими решетками кварца со следующими элементами симметрии $L_4 4 L_3 3 L_2 5 PC$. Эти элементы симметрии отвечают тетрагональной сингонии.

И.И. Шафрановский подчеркивает, говоря о симметрии петрографических текстур, надо помнить, что здесь приходится иметь дело с элементами симметрии, устанавливаемыми статистическим путем, когда на ориентирных диаграммах нет «бросающихся в глаза идеальных плоскостей и осей симметрии, привычных нам по курсу геометрической кристаллографии» [25].

Таким образом, деформированная текстура породы отвечает тетрагональному виду симметрии, а это, в свою очередь, — представлению о симметрии деформации и симметрии напряжений.

Известно, что, например, ромбический эллипсоид деформации, имеющий осями силы–векторы или напряжения-векторы, отвечает следующему виду: $P_a \neq P_b \neq P_c$ или $\sigma_a \neq \sigma_b = \sigma_c$ где *P* и σ — действующие силы или напряжения по соответствующим осям эллипсоида деформаций.

Для деформации, развивающейся по тетрагональному эллипсоиду для напряжений будет иметь по аналогии $P_a \succ P_b = P_c$.

Углы между соответствующими осями равны $\varphi = 90°$. На ориентирной диаграмме по сетке Вульфа можно вычислить размеры осей эллипсоида деформаций, пропорциональные действующим усилиям или напряжениям по соответствующей оси.

Для диаграммы на рис. 4 угол φ между плоскостью симметрии и осью с равен 29°:

$$tg\varphi = \frac{/a/}{/c/},$$

где *a, c* — размеры отрезков осей эллипсоида деформаций, отсекаемые соответствующей плоскостью симметрии.

Принимая во внимание пропорциональность между деформациями и напряжениями и обозначая $P_c = 1$, получим $P_a = P_b = 0{,}780$.

Таким образом, на глубине 800 м в этом районе имеет место анизотропное поле напряжений, характеризуемое приведенными выше величинами. Следует заметить, что величина P_c, направление которой всегда перпендикулярно слоистости, остается величиной неизвестной.

Исследования микроструктур песчаников далее по крылу Кальмиус-Торецкой котловины до глубины 1300 м выявили аналогичный характер деформирования пород. Угол падения складки менялся от 18—19° у поверхности до 3—4° на глубине 1300 м. В соответствии с изменением угла падения пород, а значит и с изменением характера деформации, изменялся вид и ориентирных диаграмм.

На рис. 5 представлены диаграммы 1, 2, 3, 4 с глубин соответственно 970, 1030, 1070 и 1300 м.

Представленные диаграммы 1, 2, 3 (рис. 5) также соответствуют элементам симметрии тетрагональной сингонии. Однако, с изменением угла падения общий вид ориентирной диаграммы деформированных пород имеет тенденцию к более «плотной упаковке». Оптические оси кварца изменяют угловое положение, приближаясь к 45°. Появляются отдельные дополнительные максимумы концентрации оптических осей. В соответствии с ними изменяют угловое положение и плоскости симметрии.

На глубине 1300 м, где складка приближается к шарниру (далее постепенный переход в Главный антиклинал Донбасса) симметрия деформированной текстуры переходит в кубическую (рис. 4, диаграмма 4). Здесь имеются $3L_4 4L_3 6L_2 9PC$. Плоскости симметрии располагаются под углом 45° к осям эллипсоида деформации. При кубической симметрии эллипсоид деформации трансформируется в шар. После напряжений становится изотропным, т.е. имеет место равномерное всестороннее сжатие.

Количество плоскостей вероятных потенциальных разломов для этого же типа деформации при изменении напряжен-

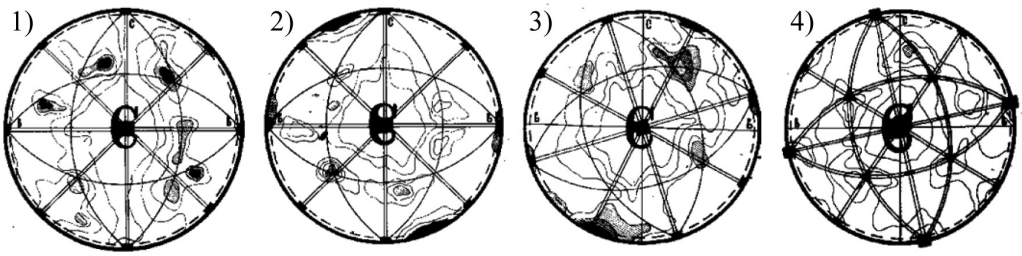

Рис. 5. Ориентирные диаграммы песчаников с глубин 970 м, 1030 м, 1070 м и 1300 м. Контуры соответствуют: 0–1–2–3–4–5–6% (1); 0–1–2–3–4–5% (2); 0–1–2–3–4% (3); 0–1–3–4–5% (4). Угол соответственно равен 34°, 34°, 38°, 40°, 45°

ного состояния может достигать 9, как это было показано нами ранее [26].

Наличие гидростатического поля напряжений на глубине 1300 м можно было бы объяснить гравитационными силами и предположить, что тектонические деформации здесь не играют определенной роли. Однако Х.В. Ферберн указывает: «Трещины скалывания при высоких значениях внешнего давления не могут развиваться непосредственно, как следствие упругой деформации, они возникают после стадии течения, вызванного скольжением» [21]. Это процесс, связанный с наличием тектонических перемещений. Тектониты, таким образом, всегда обнаруживают те или иные признаки движения компонентов или течения в твердом состоянии.

Так как тектониты обнаружены только в складчатых областях, то не возникает никакого сомнения относительно факта такого течения. Симметрия тектонитового узора на диаграмме, таким образом, статистически отображает реакцию минералов на внешнее воздействие.

Как отмечает И.С. Делицин [23], изменения внешних условий по отношению к обломочным зернам кварца вызывает ответную реакцию их, контролируемую анизотропией упругих свойств кристаллической решетки. Эта реакция предопределяет путь и механизм уменьшения внешнего воздействия в сторону устойчивого положения зерна в поле внешних напряжений. Механизм такой реакции — дислокационный, процесс — через пластическую деформацию кристаллической решетки.

На этой основе происходит пространственная переориентировка минералов, соответствующая минимуму потенциальной энергии напряженной системы горная порода — минерал.

Этот принцип минимума потенциальной энергии системы лежит в основе всех без исключения процессов литогенеза. Математически его доказать не просто, но с другой стороны, в природе не существует примеров, ему противоречащих. Этот принцип иногда называют принципом минимума диссипации энергии. Его особенность состоит в том, что природа допускает не просто те движения, при которых энтропия растет, а только те, при которых рост энтропии минимален (в пределе, нуль).

Вот почему на больших глубинах, где геостатическое давление превышает предела прочности большинства пород и они находятся в состоянии пластического деформирования, симметрия эллипсоида деформации трансформируется в шар — с элементами симметрии кубической сингонии. Как известно, это наиболее плотная и энергетически наиболее экономная (устойчивая) упаковка.

Показанные на примере песчаников Донецкого бассейна закономерности развития осадочной породы на поздних стадиях литогенеза (метагенез) расширяют представления петрографии, минералогии, кристаллографии в области поведения минеральных индивидов в поле внешних сил. Переориентировка минералов кварца отображает направление действующих тектонических напряжений.

Выводы

1. Численное моделирование упруго-пластического состояния породного массива в окрестности одиночной подземной выработки показало, что величина коэффициента бокового распора оказывает существенное влияние на перемещения контура искусственной полости, определяя ее устойчивость.

2. Аналитические методы определения величины коэффициента бокового распора не охватывают в ее спектр влияющих факторов и по этой причине не могут быть рекомендованы для прогнозной оценки этой величины.

3. Натурные исследования, являясь трудоемкими и вносящими дополнительное возмущение в начальное поле напряжений, хотя и учитывают все влияющие первопричины, тоже не могут быть признаны достаточно надежными.

4. Метод кристаллографического расположения оптических осей кварца выглядит наиболее привлекательным по отношению к аналитическим и натурным исследованиям.

5. Совокупность рассмотренных методов оценки параметров начального поля напряжений может дать положительный синергетический эффект бокового распора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Динник А. Н.* О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инженерный работник. — 1925. — № 7. — С. 1—12.

2. *Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова Е.А.* Геомеханика. — К.: Новий друк, 2016. — 258 с.

3. *Михлин С. Г.* Распределение напряжений в полуплоскости с эллиптическим вырезом // Сборник научных трудов. Сейсмологический институт АН СССР. — 1934. — № 29а. — С. 17—29.

4. *Христианович С. А.* Исследование механизма гидравлического разрыва пласта // Сборник научных трудов. Институт геологии и разработки горючих ископаемых АН СССР. — 1960. — т. 2. — С. 21—26.

5. Электронный ресурс: http://www.sibran.ru/upload/iblock/1ed/1ed34344d5a5a5d3c13ce358ef4f0273.pdf

6. Электронный ресурс: http://hge.spbu.ru/download/raspor.pdf

7. *Батугин С. А.* Напряженно-деформированное состояние нетронутого массива горных пород и его влияние на ведение горных работ: Автореф. дис. д-ра техн. наук. — Новосибирск, 1974. — 40 с.

8. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975. — 536 с.

9. *Напряженное* состояние земной коры (по измерениям в массиве горных пород) / Под ред. П. Н. Кропоткина. — М.: Наука, 1973. — 186 с.

10. *Турчанинов И. А.*, *Марков Г. А.*, *Иванов В. И. и др.* Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.

11. *Булин Н. К.* Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. — 1971. — № 3. — С. 3—15.

12. *Кропоткин П. Н.* Напряженное состояние земной копы по измерениям в горных выработках и геофизическим данным / Проблемы теоретической и региональной тектоники. — М., 1971. — С. 238—253.

13. *Влох Н. П., Сашурин А. Д.* Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. — М.: Недра, 1970. — 123 с.

14. *Марков Г. А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л.: Наука, 1977. — 213 с.

15. *Мякишев В. С.* Обзор результатов натурных измерений естественного напряженного состояния массива горных пород // Известия вузов. Геология и геофизика. — 1985. — 37 с.

16. *Борщ-Компаниец В. И.* Механика горных пород, массивов и горное давление. — М.: изд-во МГИ, 1968. — 484 с.

17. *Макаров А. Б.* Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. — М.: Изд-во «Горная книга», 2006. — 391 с.

18. *Алферов О. С.* Симметрия ориентированных структур деформированных горных пород / История кафедры строительных геотехнологий и геомеханики национального горного университета. — Донецк: Норд-Пресс, 2004. — 544 с.

19. *Sander B.* Gefugekunde der Gesteine. Vienna: Springer. 1930. 197 p.

20. *Пэк А. В.* Трещинная тектоника и структурный анализ. — Л.: Изд. АН СССР, 1939. — 152 с.

21. *Ферберн Х. В.* Структурная петрология деформированных пород. — М.: ИЛ, 1949. — 267 с.

22. *Елисеев Н. А.* Структурная петрология. — Л.: Изд. ЛГУ, 1953. — 357 с.

23. *Делицин И.С.* Структурообразование кварцевых пород. — М.: Наука, 1985. — 192 с.
24. *Елисеев Н.А.* О закономерной ориентировке в горных породах (тектониты и ложные тектониты) // Минералогический сборник. — 1962. — № 16. — С. 3—16.
25. *Юшкин Н.П., Шафрановский И.И., Янулов К.П.* Законы симметрии в минералогии. — Л.: Наука, 1987. — 335 с.
26. *Алферов О.С.* К оценке влияния тектоники на степень метаморфизма осадочных пород Донбасса // Геологический журнал. — 1964. — т. XXIV. — вып. 2. — С. 10—23. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шашенко Александр Николаевич[1] — доктор технических наук,
профессор, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua,
Смирнов Андрей Викторович — кандидат политических наук,
горный инженер, член Академии горных наук РФ,
Хозяйкина Наталья Владимировна[1] — кандидат технических наук,
доцент, e-mail: nv.khozyaykina@gmail.com,
[1] Национальный горный университет, Украина.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 37–49.
UDC 622.831

A.N. Shashenko, A.V. Smirnov, N.V. Khozyaykina

INITIAL STRESS FIELD ESTIMATION IN UNDERGROUND MINE PLANNING

The article reviews methodologies of the lateral earth pressure coefficient prediction. In terms of Stepnaya Mine conditions, DTEK, a numerical experiment is carried out to estimate stability of a single horizontal underground tunnel with RS2 software by Rockscience, Canada.

The numerical experiment results confirm that the size of the damage zone and the displacement of the tunnel boundaries essentially depend on the distribution character of the initial stress field. According to the analytical researches, the lateral earth pressure coefficient can range from less than unit (A.N. Dinnik) to unit given the hydrostatic stress distribution (A. Geim).

The field studies show that the lateral earth pressure coefficient can both be less and essentially higher than unit. The known laboratory method to determine the lateral earth pressure coefficient is based on the fact that grains of quartz in polished sections are related with the sampling place having specific natural stress field.

Thus, the methodology for the sufficiently reliable determination of the lateral earth pressure coefficient is currently available.

Key words: initial stress field, lateral earth pressure coefficient, rock mass, underground tunnel stability, methodology.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-37-49

AUTHORS

Shashenko A.N.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua,
Smirnov A.V., Candidate of Technical Sciences,
Mining Engineer, Member of Academy of Mountain Sciences
of the Russian Federation,
Khozyaykina N.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: nv.khozyaykina@gmail.com,
[1] National Mining University, 49005, Dnepr, Ukraine.

REFERENCES

1. Dinnik A. N. *Inzhenernyy rabotnik*. 1925, no 7, pp. 1—12.

2. Shashenko A.N., Pustovoytenko V.P., Sdvizhkova E.A. *Geomekhanika* (Geomechanics), Kiev, Noviy druk, 2016, 258 p.

3. Mikhlin S. G. *Sbornik nauchnykh trudov. Seysmologicheskiy institut AN SSSR*. 1934, no 29a, pp. 17—29.

4. Khristianovich S. A. *Sbornik nauchnykh trudov. Institut geologii i razrabotki goryuchikh iskopaemykh AN SSSR*. 1960, vol. 2, pp. 21—26.

5. http://www.sibran.ru/upload/iblock/1ed/1ed34344d5a5a5d3c13ce358ef4f0273.pdf

6. http://hge.spbu.ru/download/raspor.pdf

7. Batugin S. A. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie netronutogo massiva gornykh porod i ego vliyanie na vedenie gornykh rabot* (Intact rock mass stress state and its effect on the mining process), Doctor's thesis, Novosibirsk, 1974, 40 p.

8. Gzovskiy M. V. *Osnovy tektonofiziki* (Fundamentals of tectonophysics), Moscow, Nauka, 1975, 536 p.

9. *Napryazhennoe sostoyanie zemnoy kory (po izmereniyam v massive gornykh porod)*. Pod red. P. N. Kropotkina (Stress state of the earth crust (by measurements in rock masses). Kropotkin P. N. (Ed.)), Moscow, Nauka, 1973, 186 p.

10. Turchaninov I. A., Markov G. A., Ivanov V. I. *Tektonicheskie napryazheniya v zemnoy kore i ustoychivost' gornykh vyrabotok* (Tectonic stresses in the earth crust and stability of underground openings), Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.

11. Bulin N. K. *Geotektonika*. 1971, no 3, pp. 3—15.

12. Kropotkin P. N. *Problemy teoreticheskoy i regional'noy tektoniki* (Problems of theoretical and regional tectonics), Moscow, 1971, pp. 238—253.

13. Vlokh N. P., Sashurin A. D. *Izmerenie napryazheniy v massive krepkikh gornykh porod* (Stress measurement in hard rock mass), Moscow, Nedra, 1970, 123 p.

14. Markov G. A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* (Tectonic stresses and rock pressure in the Khibiny Massif mines), Leningrad, Nauka, 1977, 213 p.

15. Myakishev V. S. *Izvestiya vuzov. Geologiya i geofizika*. 1985, 37 p.

16. Borshch-Kompaniets V. I. *Mekhanika gornykh porod, massivov i gornoe davlenie* (Mechanics of rocks and rock masses, and rock pressure), Moscow, izd-vo MGI, 1968, 484 p.

17. Makarov A. B. *Prakticheskaya geomekhanika*. Posobie dlya gornykh inzhenerov (Practical geomechanics. Guide for mining engineers), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2006, 391 p.

18. Alferov O. S. *Istoriya kafedry stroitel'nykh geotekhnologiy i geomekhaniki natsional'nogo gornogo universiteta* (History of the Chair of Construction Technologies and Geomechanics at the National Mining University), Donetsk, Nord-Press, 2004, 544 p.

19. Sander B. *Gefugekunde der Gesteine*. Vienna: Springer. 1930. 197 p.

20. Pek A. V. *Treshchinnaya tektonika i strukturnyy analiz* (Fracture tectonics and structural analysis), Leningrad, Izd. AN SSSR, 1939, 152 p.

21. Ferbern Kh. V. *Strukturnaya petrologiya deformirovannykh porod* (Structural petrology of deformed rocks), Moscow, IL, 1949, 267 p.

22. Eliseev N. A. *Strukturnaya petrologiya* (Structural petrology), Leningrad, Izd. LGU, 1953, 357 p.

23. Delitsin I. S. *Strukturoobrazovanie kvartsevykh porod* (Structure formation in quartz rocks), Moscow, Nauka, 1985, 192 p.

24. Eliseev N. A. *Mineralogicheskiy sbornik*. 1962, no 16, pp. 3—16.

25. Yushkin N.P., Shafranovskiy I.I., Yanulov K.P. *Zakony simmetrii v mineralogii* (The laws of symmetry in mineralogy), Leningrad, Nauka, 1987, 335 p.

26. Alferov O. S. *Geologicheskiy zhurnal*. 1964. vol. XXIV., issue 2, pp. 10—23.