УДК 622.83

А.Г.ОЛОВЯННЫЙ, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, (812) 328 86 55*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.G.OLOVYANNY, *PhD in eng. sc., leading research assistant, (812) 328 86 55*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

БОКОВОЙ РАСПОР В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Исследуются напряжения бокового распора в массиве горных пород. Установлено, что в формировании бокового распора, наряду с упругими деформациями пород, важную роль играют вязкоупругие. Получена зависимость коэффициента бокового распора от упругих и вязкоупругих свойств горных пород, которая дает более точные оценки напряженного состояния в массиве горных пород, чем определяемые с учетом только их упругого поведения.

***Ключевые слова*:** горные породы, напряженное состояние, боковой распор, вязкоупругие деформации.

LATERAL EARTH PRESSURE IN ROCK MASS

The stress state of rock mass is determined by weight of overburden and the lateral earth pressure. It was stated that the stress state of rock mass has been originated with contribution of the lateral earth pressure in which the important role play the viscoelastic properties of rocks was obtained, which gives more precise assessments of stress state in rock mass than the determined ones with account of only elastic behavior.

***Key words*:** rocks, stress state, lateral earth pressure, viscoelastic deformations.

Если вертикальная составляющая напряжений в массиве горных пород определяется весом налегающей толщи, то горизонтальная – так называемый боковой распор – деформационными свойствами пород и наличием тектонических сил [4]. Такого рода сентенции можно встретить в большинстве работ, связанных с проблемой горного давления.

Предполагается, что гравитационные напряжения в нетронутом массиве чаще всего соответствуют гипотезе А.Н. Динника, согласно которой по условиям упругого поведения боковой распор

$$\lambda_0 = \nu/(1-\nu), \qquad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

«Это состояние обычно приписывают участкам массива изверженных или осадочных пород на сравнительно небольших глубинах. По-видимому, достаточно уверенно можно полагать, что это распределение напряжений может иметь место на глубинах до 500 м. На больших глубинах возрастает вероятность гидростатического распределения гравитационных напряжений» [3, с.7]. Хотя такое представление широко распространено, специалисты относятся к нему с сомнением, поскольку такой закон может быть применен только к толще горных пород, толкуемой как упругая, сплошная и изотропная среда [2].

На основании собственных исследований и анализа многочисленных литературных данных авторы работы [1] утверждают, что в соляных массивах напряженное состояние близко к гидростатическому. Поскольку коэффициент Пуассона соляных пород составляет 0,25-0,35, то, исходя из законов упругости, боковой распор должен быть значительно меньше единицы (0,33-0,54), что говорит об отсутствии жесткой зависимости напряженного состояния пород в массиве от упругих свойств. А.Надаи считает,

что «в верхних слоях земной коры вблизи ее поверхности главные напряжения отличаются друг от друга и различны в разных точках пласта пород из-за местных нарушений их равновесия под действием собственного веса. Однако под этой поверхностной зоной состояние равновесия с увеличением глубины быстро становится приблизительно гидростатическим и характеризуется во всех точках, расположенных в горизонтальной плоскости, равными давлениями, действующими одинаково во всех направлениях» [7, с.757].

Наблюдавшиеся особенности проявлений горного давления не получили объяснения на основе упругой гравитационной модели или гидростатического напряженного состояния. В связи с этим широкое развитие получило представление о тектонических силах, действующих в массиве горных пород [6].

Рассмотрим влияние вязких свойств, в разной степени присущих всем горным породам, на напряженное состояние в массиве горных пород. В породах, вязкость которых описывается уравнениями типа Максвелла, величина вязких деформаций не ограничена, боковой распор равен единице [5]. Вывод о гидростатическом напряженном состоянии в работе [7] сделан из таких же соображений.

В лабораторных экспериментах с цилиндрическими образцами при одноосном нагружении с запрещением боковых деформаций получено, что отношение напряжений, обеспечивающих отсутствие боковых деформаций, к давлению на образец зависит от уровня нагружения и времени испытания [9].

Исходя из упругого поведения образцов, такие результаты можно объяснить изменчивостью коэффициента Пуассона, который в этой связи будем называть далее коэффициентом поперечной деформации. В работе [9] предполагается, что поскольку при росте осевой нагрузки боковой распор стремится к единице, то коэффициент поперечной деформации стремится к 0,5. При этом модуль упругости уменьшается.

Вязкие деформации горных пород обычно не подчиняются закону течения Максвелла. При нагрузках, не приводящих к разрушению, вязкие деформации ограничены. Рассмотрим, как на боковой распор может влиять длительность испытания при ограниченных вязких деформациях. Поскольку в однородных ненарушенных образцах при нагружении с запрещенными боковыми деформациями разрушения не возникают, можно говорить об упругой (обратимой) вязкости.

Рассмотрим условия вязкоупругого деформирования, полагая, что объемные вязкоупругие деформации отсутствуют [10]:

$$\varepsilon_1^{ve} + \varepsilon_2^{ve} + \varepsilon_3^{ve} = 0,$$

где $\varepsilon_1^{ve}, \varepsilon_2^{ve}$ и ε_3^{ve} – компоненты нормальных вязкоупругих деформаций в прямоугольной системе координат.

При монотонном нагружении и при длительном действии нагрузок вязкоупругие деформации пропорциональны упругим; в таких случаях

$$\varepsilon_i^{ve} = \frac{1}{3} K_{ve} (2\varepsilon_i^e - \varepsilon_j^e - \varepsilon_k^e); \qquad \gamma_{ij}^{ve} = K_{ve} \gamma_{ij}^e, \tag{2}$$

где $\varepsilon_i^e, \varepsilon_j^e, \varepsilon_k^e$, γ_{ij}^e и ε_i^{ve}, γ_{ij}^{ve} – компоненты упругих и вязкоупругих деформаций соответственно; i, j и k – номера осей прямоугольной системы координат (принимают значения 1, 2 и 3); K_{ve} – коэффициент пропорциональности между сдвиговыми упругими и вязкоупругими деформациями.

В условиях рассматриваемого эксперимента, компоненты деформаций цилиндрического образца могут быть представлены как сумма упругой и вязкоупругой составляющих:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)\right] + \varepsilon_z^{ve}; \\ \varepsilon_r &= \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)\right] + \varepsilon_r^{ve} = 0; \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)\right] + \varepsilon_\theta^{ve} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где σ_r, σ_θ, σ_z и ε_r, ε_θ, ε_z – компоненты соответственно напряжений и деформаций в цилиндрической системе координат; $\varepsilon_r^{ve}, \varepsilon_\theta^{ve}, \varepsilon_z^{ve}$ –

составляющие вязкоупругих деформаций; E – модуль упругости.

Поскольку в условиях осевой симметрии при отсутствии радиальных перемещений деформации и напряжения по направлениям осей r и θ равны между собой, введем обозначения индексов: 1 – для оси z; 2 – для осей r и θ.

При монотонном росте давления на образец обеспечивается условие простого пути нагружения; в этом случае вязкоупругие сдвиговые деформации пропорциональны соответствующим упругим. Исходя из условия несжимаемости, с учетом (2) для вязкоупругих деформаций цилиндрического образца (3), можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{ve} &= \frac{2}{3}K_{ve}\left(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e\right); \\ \varepsilon_2^{ve} &= -\frac{1}{3}K_{ve}\left(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e\right). \end{aligned} \qquad (4)$$

В условиях рассматриваемого эксперимента, учитывая (3) и (4), выражения связи между компонентами главных упругих деформаций и осевой деформацией образца примут вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^e + \frac{2}{3}K_{ve}\left(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e\right) &= \varepsilon_z; \\ \varepsilon_2^e - \frac{1}{3}K_{ve}\left(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e\right) &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда следует

$$\varepsilon_1^e = \frac{1+\frac{1}{3}K_{ve}}{1+K_{ve}}\varepsilon_z;\ \varepsilon_2^e = \frac{\frac{1}{3}K_{ve}}{1+K_{ve}}\varepsilon_z; \qquad (5)$$

$$\varepsilon_1^{ve} = \frac{\frac{2}{3}K_{ve}}{1+K_{ve}}\varepsilon_z;\ \varepsilon_2^{ve} = -\frac{\frac{1}{3}K_{ve}}{1+K_{ve}}\varepsilon_z. \qquad (6)$$

Поскольку напряжения определяются только упругими деформациями, то из соотношений (3) получим

$$\sigma_1 = E\frac{(1-\nu)\varepsilon_1^e + 2\nu\varepsilon_2^e}{1-\nu-2\nu^2};\ \sigma_2 = E\frac{\nu\varepsilon_1^e + \varepsilon_2^e}{1-\nu-2\nu^2}. \qquad (7)$$

С учетом (7) найдем отношение боковых напряжений к осевым, определяющее боковой распор:

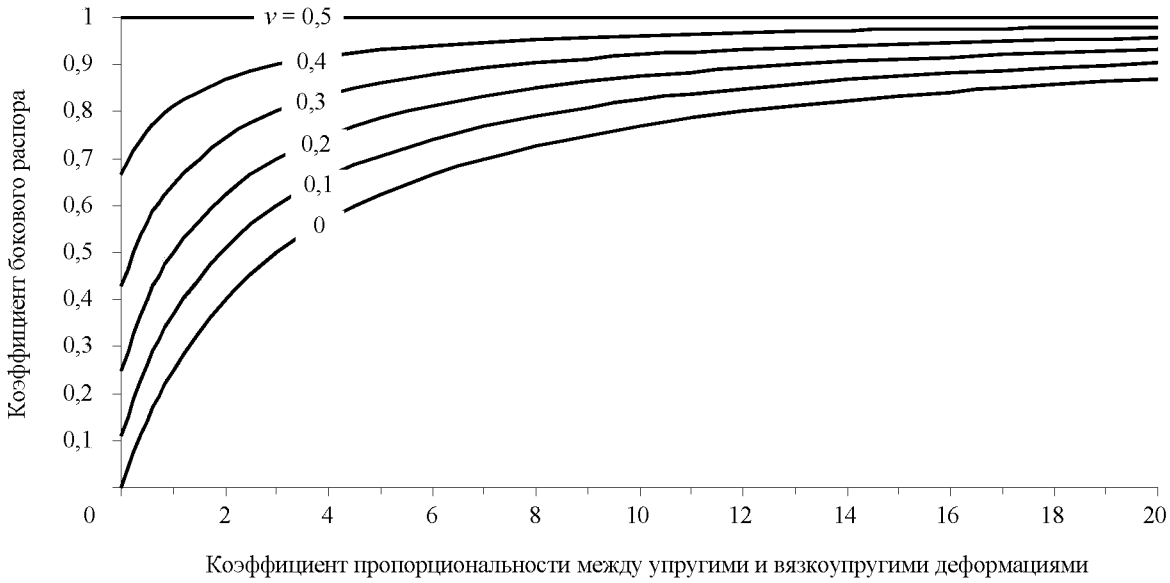
$$\lambda = \frac{\nu + \frac{1}{3}K_{ve}(1+\nu)}{1-\nu+\frac{1}{3}K_{ve}(1+\nu)}. \qquad (8)$$

При длительных испытаниях при постоянном давлении на образец отношение γ^{ve}/γ^e асимптотически стремится к некоторой величине, а значит, и коэффициент бокового распора λ стремится к величине, отличающейся от λ_0.

Как следует из (8), коэффициент бокового распора зависит от коэффициента поперечной деформации и от соотношения вязкоупругих и упругих деформаций. Наблюдаемый в экспериментах с образцами рост бокового распора может быть объяснен изменением либо одного, либо обоих параметров.

Если коэффициент поперечной деформации не меняется, то рост бокового распора может быть обусловлен только вязкоупругими деформациями. С помощью графиков (см. рисунок), рассчитанных по формуле (8), можно проследить, как меняется коэффициент бокового распора в зависимости от вязкоупругих деформаций. Параметром вязкоупругих деформаций служит величина $K_{ve} = \gamma^{ve}/\gamma^e$, которая достигается в конце испытания образца. В массивах горных пород в течение геологических периодов это отношение достигает максимальной величины, свойственной данной породе. Тогда формула (8) определит коэффициент бокового распора в массиве горных пород. Возникает вопрос, является ли это отношение константой материала или оно существенно зависит от напряженного состояния.

Из графиков видно, что даже для прочных и хрупких пород (например, песчаников и гранитов), вязкоупругие деформации которых не превышают упругих ($K_{ve} < 1$), коэффициент бокового распора может значительно отличаться от λ_0. Так, при $\nu = 0{,}2$ коэффициент бокового распора меняется от 0,25 до 0,63 при K_{ve}, растущем от 0 до 1. Для пластичных соляных или глинистых пород, вязкоупругие деформации которых могут быть больше упругих в 5-30 раз (K_{ve} = 2-10 и



Зависимость коэффициента бокового распора от коэффициента пропорциональности между упругими и вязкоупругими деформациями для пород с различными свойствами

более), коэффициент бокового распора может превысить 0,6 даже при $\nu = 0{,}1$, а при $\nu = 0{,}3$ достичь 0,7 (см. рисунок).

Графики зависимости коэффициента бокового распора от коэффициента поперечной деформации (см. рисунок) отражают ситуацию в массиве пород с горизонтальным рельефом поверхности и залеганием пластов, где за длительный (геологический) период времени соотношения между вязкоупругими и упругими деформациями достигли предельной величины.

Широко распространено представление о том, что на формирование горного давления, кроме упругих деформаций (о вязкоупругих обычно не говорят), влияют «пластические», возникающие на некоторой глубине в зонах предельного напряженного состояния [8].

Рассмотрим возможность присутствия в массиве пород зоны предельного напряженного состояния. В рамках теории Кулона – Мора условие предельного состояния в зоне всестороннего сжатия в терминах главных напряжений представляется соотношением

$$\sigma_{max} - \beta\sigma_{min} = \sigma_c, \qquad (9)$$

где σ_{max} и σ_{min} – максимальные и минимальные главные напряжения; σ_c – прочность при одноосном сжатии; $\beta = (1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$; φ – угол внутреннего трения.

В нетронутом массиве

$$\sigma_{max} = \rho g h;\ \sigma_{min} = \lambda\rho g h, \qquad (10)$$

где ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; h – глубина.

Из (9) с учетом (10) имеем глубину, на которой формируются условия предельного состояния:

$$h = \frac{\sigma_c}{\rho g(1-\beta\lambda)}. \qquad (11)$$

Рассчитаем, на какой глубине возможен переход в предельное состояние при $\beta > 2$ ($\varphi > 20°$) и $\lambda > 0{,}5$. Поскольку в этих условиях $\beta\lambda > 1$, то из (11) следует необходимость $h < 0$, что невыполнимо. Ситуация $\beta\lambda > 1$, как правило, соответствует реальным условиям. Следовательно, можно утверждать, что в массиве пород зоны с предельными условиями напряженного состояния и «пластическими» деформациями отсутствуют и, значит, не могут влиять на формирование напряженного состояния породного массива. Исключением могут быть зоны тектонических разрывов.

В работе [9] предполагается, что коэффициент бокового распора меняется вместе с коэффициентом поперечной деформации, который, как и модуль упругости, зависит от напряженного состояния. Однако изменение модуля упругости и коэффициента поперечной деформации, отмеченные в экспериментах, могут быть объяснены наличием вязкоупругих деформаций. Учитывая формулы (7), выражающие зависимости между напряжениями и осевой деформацией в условиях запрещения бокового расширения, получим выражение для отношения кажущегося модуля деформации к модулю упругости:

$$\frac{D}{E}=\frac{1-v+\frac{1}{3}K_{ve}(1+v)}{(1-v)(1+K_{ve})}<1.$$

При росте вязкоупругих деформаций это отношение уменьшается, что и наблюдается в экспериментах и иногда интерпретируется как снижение модуля упругости при увеличении напряжений.

Результаты исследований, проведенных на образцах солевых и глинистых пород, дали основание авторам монографии [9] утверждать, что при осевых нагрузках, превышающих в 5-7 раз прочность породы при одноосном сжатии, напряженное состояние соляных и глинистых пород переходит в гидростатическое (или близкое к нему) состояние. В таком случае предельная глубина, на которой породы могут перейти в гидростатическое состояние, когда нормальные напряжения по всем направлениям одинаковы,

$$H_{\text{пр}}\geq\frac{(5\div 7)\sigma_c}{\rho g}. \qquad (12)$$

При параметрах $\rho g = 2{,}5$ т/м^3 и $\sigma_c =$ = 20 МПа, свойственных каменной соли, эта глубина больше 4000-6000 м (здесь ρ – плотность, g – ускорение свободного падения). Этот результат свидетельствует о том, что если зависимость коэффициента поперечной деформации от глубины и существует, то очень слабая, и в пределах глубин подземной разработки полезных ископаемых его можно считать постоянным.

По современным представлениям в соляном массиве пород на глубине выемки полезных ископаемых 500-1000 м и более коэффициент бокового распора близок к единице. При $v > 0{,}3$ и $K_{ve} > 3$ рассчитанный по формуле (8) коэффициент $\lambda > 0{,}8$ (см. рисунок), что соответствует этим представлениям. Здесь K_{ve} определяется для предельных значений сдвиговых вязкоупругих деформаций, достигаемых в массиве горных пород за геологические периоды времени.

Для прочных пород, у которых $0{,}5 < K_{ve} < 1$ и $0{,}2 < v < 0{,}3$, коэффициент бокового распора находится в интервале 0,55-0,75, что существенно отличается от рассчитываемого с учетом только упругих деформаций бокового распора $\lambda_0 = 0{,}25 \div 0{,}43$.

Если соотношение (12) применимо не только для соляных и глинистых пород, то при расчете бокового распора для глубин промышленной деятельности зависимость коэффициента поперечной деформации от глубины можно не учитывать.

С.Н.Савченко [11], анализируя керн Кольской сверхглубокой скважины, установил, что до отметки 11,5 км среднее значение отношения действующих горизонтальных напряжений к вертикальным составляет около 0,777 и практически не зависит от глубины. Отклонение в 2-3 раза, а на отдельных глубинах в 4 раза действующих боковых напряжений от напряжений упругого распора автор объясняет наличием тектонических сил, которые растут с глубиной по линейному закону.

Приняв $v = 0{,}25$ и подставив в формулу (8) при $\lambda = 0{,}777$, найдем среднее по глубине предельное отношение вязкоупругих деформаций к упругим: $\gamma^{ve}/\gamma^{e} = 3{,}21$.

Обнаруженное постоянство коэффициента бокового распора при глубине до 11,5 км на Кольской сверхглубокой скважине служит подтверждением полученных в нашей работе результатов. Поскольку геостатические напряжения вдоль скважины меняются с глубиной от нуля до 300 МПа и более, то это постоянство является косвенным подтверждением наличия такой константы материала как предельное отноше-

ние вязкоупругих и упругих деформаций для основных пород в этом разрезе.

Коэффициент бокового распора может быть представлен формулой (8) или записан в виде

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \frac{\frac{1}{3} K_{ve}(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu[1-\nu+\frac{1}{3}K_{ve}(1+\nu)]} \right], \qquad (13)$$

откуда видно, что его величина всегда больше λ_0.

Результаты анализа экспериментальных данных, приведенных в работе [11], интерпретируются автором с позиций тектонических сил. Полученные в этой работе результаты, на наш взгляд, с бóльшим основанием можно объяснить тем, что боковой распор зависит от отношения вязких и упругих составляющих деформаций, которые меняются с глубиной в той мере, в какой меняются упругие и, что важно, вязкие свойства горных пород. В этом случае это отношение практически не меняется.

Таким образом, на основе анализа вязких свойств, в разной степени присущим всем горным породам, 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 объясняется, 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 случаев (зоны тектонических разрывов не рассматриваются) не возникают условия предельного напряженного состояния, влияющие на формирование напряжений бокового распора в массиве пород.

Боковой распор определяет отношение напряжений, действующих в массиве пород со «спокойным» рельефом поверхности и горизонтальным залеганием слоев пород с различной плотностью. Для массивов пород с гористым рельефом поверхности, при крутом падении слоев пород или с неоднородными включениями понятие бокового распора для оценки действующих напряжений, строго говоря, не применимо. В общем случае напряжения могут быть рассчитаны при решении краевых задач, в которых учитываются соотношения (2), полагая в них значения K_{ve} предельными для каждой породы, достигаемыми за длительный геологический период.

В тех случаях, когда задача может быть решена в постановке плоской деформации, можно воспользоваться следующими соображениями. Направление одного из главных напряжений (будем считать его третьим) совпадает с перпендикуляром к поверхности разреза. По этому направлению деформация отсутствует, т.е.

$$\varepsilon_{33}^{e} + \varepsilon_{33}^{ve} = 0 .$$

Откуда, учитывая (2), получим

$$\varepsilon_{33}^{e} = \xi(\varepsilon_{11}^{e} + \varepsilon_{22}^{e}), \text{ где } \xi = \frac{K_{ve}}{3 + 2K_{ve}} .$$

Таким образом, при расчете напряжений в нетронутом массиве в условиях плоской деформации вместо соотношений (2) необходимо учитывать следующие зависимости, связывающие вязкоупругие и упругие деформации:

$$\varepsilon_{11}^{ve} = \frac{1}{3} K_{ve} \left[2\varepsilon_{11}^{e} - \varepsilon_{22}^{e} - \xi(\varepsilon_{11}^{e} + \varepsilon_{22}^{e}) \right];$$

$$\varepsilon_{22}^{ve} = \frac{1}{3} K_{ve} \left[2\varepsilon_{22}^{e} - \varepsilon_{11}^{e} - \xi(\varepsilon_{11}^{e} + \varepsilon_{22}^{e}) \right];$$

$$\varepsilon_{33}^{ve} = \frac{1}{3} K_{ve} \left[2\xi(\varepsilon_{11}^{e} + \varepsilon_{22}^{e}) - \varepsilon_{11}^{e} - \varepsilon_{22}^{e} \right];$$

$$\gamma_{12}^{ve} = K_{ve} \gamma_{12}^{e} .$$

В настоящее время широкое распространение получило суждение о тектонических силах, как об одном из главных факторов, определяющих горное давление. Рас-

плывчатые соображения, основанные на приблизительных оценках этих явлений, часто не позволяют принимать уверенные решения. Предлагаемый способ, учитывающий упругие и вязкоупругие свойства пород, дает возможность во многих случаях с большей определенностью оценивать горное давление. Наличие тектонических сил при этом не исключается.

В силу природы тектонических сил, возникающих при движении тектонических плит, тектонические напряжения зависят от деформаций, которые не меняются с глубиной. Так при сжатии плиты до деформации $\varepsilon_т$ тектонические напряжения сжатия приведут к увеличению напряжений в этом направлении на величину

$$\sigma_т = \frac{E\varepsilon_т}{(1-\nu^2)},$$

которая меняется с глубиной только вместе с изменением свойств пород. При этом влияние тектонических напряжений на коэффициент бокового распора с глубиной снижается.

Полученные результаты позволяют судить о том, что при оценке напряженного состояния массивов горных пород в настоящее время роль тектонических сил во многих случаях завышается. Независимо от наличия тектонических сил, боковой распор присутствует практически всегда, и, что существенно, его относительная величина не зависит от уровня напряжений. Зависимость от глубины может возникать, главным образом, в связи с изменчивостью физико-механических свойств горных пород.

Предложенный здесь подход позволяет точнее рассчитать начальное поле напряжений в массиве горных пород, что важно при математическом моделировании, когда встает вопрос о граничных и начальных условиях для рассматриваемых областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барях А.А.* Деформирование соляных пород / А.А.Барях, С.А.Константинова, В.А.Асанов / УрО РАН. Екатеринбург, 1996. 204 с.

2. *Дашко Р.Э.* Механика горных пород: Учебник для вузов. М., 1987. 264 с.

3. *Каспарьян Э.В.* Устойчивость горных выработок в скальных массивах. Л., 1985. 184 с.

4. *Крупенников Г.А.* Распределение напряжений в породных массивах / Г.А.Крупенников, Н.А.Филатов, Б.З.Амусин, В.М.Барковский. М., 1972. 143 с.

5. *Либерман Ю.М.* Естественное напряженное состояние массива горных пород // Тр. ВНИИСТ. М., 1962. Вып.12. С.24-30.

6. *Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л., 1977. 213 с.

7. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М., 1969. Т.2. 864 с.

8. *Петухов И.М.* Геодинамика недр / И.М.Петухов, И.М.Батугина. СПб, 1999. 190 с.

9. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М.Карташов, Б.В.Матвеев, Г.В.Михеев, А.Б.Фадеев. М., 1979. 269 с.

10. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М., 1966. 752 с.

11. *Савченко С.Н.* Оценка напряженного состояния горных пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины // ФТПРПИ. 2004. № 1. С.27-34.

REFERENCES

1. *Baryakh A.A.* Deformation of saliferous rocks / A.A.Baryakh, S.A.Konstantinova, V.A.Asanov / UrD RAS. Yekaterinburg, 1996, 204 p.

2. *Dashko R.E.* Rock mechanics. Test-book for Higher Institutions. Moscow, 1987. 264 p.

3. *Kasparyan E.V.* Stability of mine workings in rocky mass. Leningrad., 1985. 184 p.

4. *Krupennikov G.A.* Distribution of stresses in rock mass / G.A.Krupennikov, N.A.Filatov, B.Z.Amusin, V.M.Barkovsky. Moscow, 1972. 143 p.

5. *Liberman Yu.M.* Natural stress state of rock mass / Proc. VNIIST. Moscow, 1962. Issue 12. P.24-30.

6. *Markov G.A.* Tectonic stresses and rock pressure in ore mines of the Khibini massif. Leningrad, 1977. 213 p.

7. *Nadai A.* Theory of flow and fracture of solids. Moscow, 1969. Vol.2. 864 p.

8. *Petukhov I.M., Batugina I.M.* Geodynamics of the Earth's interior / I.M.Petukhov, I.M.Batugina Saint Petersburg, 1999. 190 p.

9. Strength and deformability of rocks / Yu.M.Kartashov, B.V.Matveev, G.V.Mikheev, A.B.Fadeev. Moscow: Nedra, 1979. 269 p.

10. *Rabotnov Yu.N.* Creeping of elements of constructions. Moscow, 1966. 752 p.

11. *Savchenko S.N.* Evaluation of stress state of rocks within the range of boring of the Kola superdeep hole // FTPRPI. 2004. № 1. P.27-34.