

11. Karasev M. A. Analiz prichin deformatsii zemnoy poverkhnosti i kharakter formirovaniya muldy osedaniya, vyzvannoy stroitelstvom transportnykh tonneley (Analysis of earth surface deformation reasons and a nature of subsidence trough formation caused by the construction of transport tunnels). *Zapiski gornogo instituta = Proceedings of the Mining Institute*. 2011. No. 190. pp. 163–171.
12. Olovyanyy A. G. *Mekhanika gornnykh porod. Modelirovanie razrusheniy* (Rock mechanics. Simulation of destruction). Saint Petersburg: Kosta, 2012. 280 p.
13. Volokhov E. M., Potemkin D. A. Matematicheskoe modelirovanie geomekhanicheskikh protsessov pri otsenke vliyaniya stroitelstva gorodskikh podzemnykh sooruzheniy na podrabatyvaemyy massiv (Mathematical simulation of geomechanical processes in evaluation of the impact of urban underground facilities construction on undermining massif). *Zapiski gornogo instituta = Proceedings of the Mining Institute*. 2011. No. 190. pp. 284–288.
14. Mair R. J. Tunnelling and geotechnics: new horizons. *Geotechnique*. 2008. No. 9(58). pp. 695–736.
15. Lunardi P. Design and construction of tunnels – Analysis of controlled deformation in rocks and soil (ADECO-RS). Translation by B. A. James Davis. Springer, Berlin, German, 2008. 576 p.
16. Chacari H., Ozcelic V., Unver B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 36. pp. 14–23.
17. Thongprapha T., Fuenkajorn K., Daemen J. J. K. Study of surface subsidence above an underground opening using a trap door apparatus. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 46. pp. 94–103.
18. Baziar M. H., Moghadam M. R., Kim D.-S., Choo Y. W. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. Vol. 44. pp. 10–22.
19. Mazein S. V., Pavlenko A. M. Vliyaniye tekhnicheskikh parametrov shchitovoi prokhodki na osadku poverkhnosti (Effect of the current parameters of shield tunneling on the surface subsidence) *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007. No. 5, seminar No. 15. pp. 133–138.
20. Dindarloo S. R., Siami-Irdemoosa E. Maximum surface settlement based classification of shallow tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 49. pp. 320–327.

УДК 622.83

## БОКОВОЙ РАСПОР И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД



**А. Г. ОЛОВЯННЫЙ,**  
ведущий научный сотрудник,  
АО «ВНИИ Галургии»,  
канд. техн. наук,  
Санкт-Петербург, Россия,  
agolov2009@hgepro.ru

### Введение

Напряженное состояние нетронутого массива горных пород формируется под действием сил тяжести, движения литосферных плит, сил гидростатического взвешивания, других природных воздействий и служит исходной информацией для расчета подземных сооружений и элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых [1–4]. Основной и активно формирующей напряженное состояние в массивах горных пород является сила тяжести, определяющая вертикальную составляющую действующих напряжений. Считают, что в верхних слоях литосферы (земной коры) вблизи ее поверхности главные напряжения отличаются друг от друга в разных точках пласта пород из-за местных нарушений их равновесия под действием собственного веса. Однако ниже приповерхностной зоны состояние равновесия с увеличением глубины быстро становится приблизительно гидростатическим и характеризуется во всех точках, расположенных в горизонтальной плоскости, равными давлениями, действующими

Статья посвящена актуальной проблеме расчета и учета боковых напряжений в нетронутым массиве горных пород, возникающих под действием гравитационных и тектонических напряжений. Анализируя известные подходы к определению напряжений бокового распора, автор представляет новый способ оценки напряженного состояния массивов с учетом упругих и вязкоупругих деформаций горных пород.

Предложенные новые подходы к расчету начального поля напряжений в массиве горных пород имеют большое научное и практическое значение для принятия обоснованных инженерных решений в проектах освоения недр, в том числе на больших глубинах.

**Ключевые слова:** массивы горных пород, напряженное состояние, гравитационные и тектонические напряжения, боковой распор, упругие и вязкоупругие деформации, нарушение сплошности массива, начальные и граничные условия.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.05>

одинаково во всех направлениях [5], что отражает так называемую гипотезу А. Гейма о гидростатическом напряженном состоянии. Другой широко распространенный подход предполагает, что гравитационные напряжения в нетронутым массиве чаще всего соответствуют гипотезе А. Н. Динника, согласно которой по условиям упругого поведения боковой распор

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

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Авторы работы [6] на основании собственных исследований и анализа литературных данных утверждают, что в соляных массивах напряженное состояние близко к гидростатическому, а поскольку коэффициент Пуассона соляных пород составляет 0,25–0,35, то, исходя из законов упругости (гипотеза А. Н. Динника), боковой распор должен быть значительно меньше единицы (0,33–0,54). Представление о напряжениях в массивах соляных пород противоречит гипотезе упругого отпора, что показывает отсутствие жесткой зависимости напряженного состояния пород в массиве только от упругих свойств. Попытка подтвердить гипотезу упругого распора с привлечением теплофизических свойств горных пород [7] представляется не убедительной. Наблюдавшиеся особенности напряженного состояния массивов, содержащих в своем строении пластические, хрупкие, вязкие, дискретные породы, не получили объяснения на основе упругой гравитационной модели или гидростатического напряженного состояния.

Земная кора рассечена тектоническими разрывами, которые являются границами тектонических плит, движение которых относительно друг друга приводит к их деформациям и появлению тектонических напряжений, участвующих в формировании напряженного состояния в массивах горных пород. В связи с этим широкое развитие получило представление о тектонических напряжениях, вызванных движением литосферных плит [8–12]. Для однородных частей массивов горных пород выявлено существенное влияние вязких свойств на боковой распор и тектонические напряжения [13].

### Боковой распор как реактивный отпор действиям гравитационных сил

В лабораторных условиях реактивный отпор моделируют при одноосном сжатии цилиндрического образца с запрещением боковых деформаций. При этом установлено, что отношение напряжений, обеспечивающих отсутствие боковых деформаций, к давлению на образец зависит от уровня нагружения и времени испытания. Исходя только из упругого поведения образцов, такие результаты можно объяснить изменчивостью коэффициента Пуассона. В работе [14] предполагается, что поскольку в вязких соляных породах при росте осевой нагрузки боковой распор стремится к единице, то коэффициент поперечной деформации стремится к 0,5. При этом модуль упругости также меняется в меньшую сторону. При анализе результатов экспериментов учитывали только упругие свойства горных пород.

Исследовано влияние вязких свойств, в разной степени присутствующих всем горным породам. При этом поведение пород, вязкость которых описывается уравнениями типа Максвелла, подобно вязкой жидкости, величина вязких деформаций не ограничена, а боковой распор равен единице, что согласуется с гипотезой А. Гейма. Однако деформации горных пород обычно не подчиняются закону течения Максвелла: при нагрузках, не приводящих к разрушению (когда напряжения меньше длительной прочности), вязкие деформации ограничены. На боковой распор может влиять длительность испытания при ограниченных вязких деформациях. Поскольку при нагружении с запрещенными боковыми де-

формациями в однородных образцах разрушения не возникают, то можно судить о наличии упругой (обратимой) вязкости.

Часто встречающиеся структуры слоев пород, изогнутых в складки, показывают, что в условиях сжатия значения деформаций сдвига могут существенно (на порядки) превышать величины объемного сжатия. Компоненты части вязких деформаций, создающих изменение объема, можно считать пропорциональными компонентам упругих деформаций. В таком случае для горизонтальной плоскости однородного массива зависимость деформаций от напряжений может быть записана в виде

$$\epsilon_x = \frac{1 + \zeta}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad (2)$$

где  $x, y, z$  — оси прямоугольной системы координат;  $\epsilon_x$  — деформация в направлении оси  $x$ ;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — компоненты напряжений;  $E$  — модуль упругости;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\zeta$  — параметр, определяющий долю сжимаемой вязкой составляющей деформаций. Принимая ось  $z$  в вертикальном направлении, оси  $x$  и  $y$  в горизонтальной плоскости и учитывая соотношения  $\epsilon_x = 0$ ;  $\sigma_y = \sigma_x$ , из формулы (2) получаем:  $\sigma_x = \nu\sigma_z/1 - \nu$ ;  $\lambda = \lambda_0$ . Таким образом, сжимаемые вязкие деформации не влияют на формирование напряженного состояния (боковой распор такой же, как в упругом массиве).

Влияние вязкоупругих деформаций, обеспечивающих только сдвиговые составляющие, описывается уравнением

$$\epsilon_1^{ve} + \epsilon_2^{ve} + \epsilon_3^{ve} = 0, \quad (3)$$

где  $\epsilon_1^{ve}, \epsilon_2^{ve}, \epsilon_3^{ve}$  — компоненты нормальных вязкоупругих деформаций за вычетом объемных в прямоугольной системе координат. При напряжениях, меньших длительной прочности, судя по изохронным графикам деформаций [14, 15], вязкоупругие деформации многих горных пород практически линейны. В частности, изохронные графики деформирования галита и горючего сланца (рис. 1), приведенные в работе [10], линейны в некотором диапазоне нагрузок. Отклонение от линейности для галита при напряжениях, превышающих 13 МПа, объясняется выходом за пределы вязкоупругости на участок активизации ползучести (участок вязкопластичности или вязкого разрушения). Испытания образцов аргиллита, алевролита и песчаника [15] свидетельствуют, что при нагружении образцов до напряжений, не превышающих 0,6 прочности при одноосном сжатии, связь между напряжениями и деформациями близка к линейной для любого момента времени.

Исходя из этого, можно считать, что для большого числа типов горных пород при монотонном нагружении и длительном действии нагрузок вязкоупругие деформации пропорциональны упругим, и в этом случае справедливы соотношения

$$\begin{aligned} \epsilon_1^{ve} - \epsilon_2^{ve} &= k_{ve}(\epsilon_1^e - \epsilon_2^e); \\ \epsilon_1^{ve} - \epsilon_3^{ve} &= k_{ve}(\epsilon_1^e - \epsilon_3^e); \\ \epsilon_1^{ve} - \epsilon_1^{ve} &= k_{ve}(\epsilon_1^e - \epsilon_1^e); \end{aligned}$$

где  $k_{ve}$  — коэффициент пропорциональности между вязкими и упругими деформациями сдвига. Просуммировав левые и правые

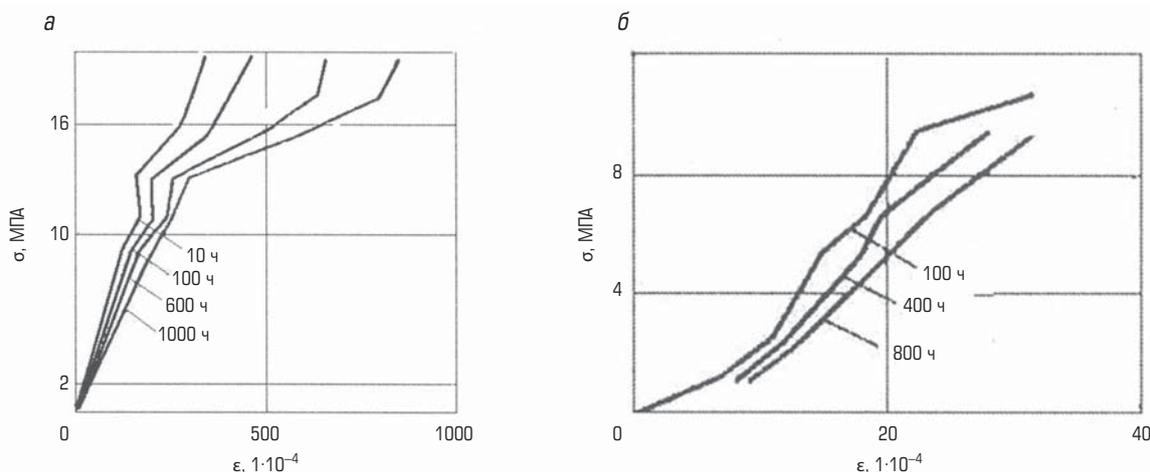


Рис. 1. Изокронные графики деформирования галита (а) и горючего сланца (б) [8]

части этих равенств и учитывая условие (2), получим  $3\varepsilon_1^{ve} = k_{ve}(2\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e - \varepsilon_3^e)$ . С помощью круговой подстановки индексов 1, 2 и 3 получим еще два аналогичных выражения. Таким образом, связь между вязкоупругими и упругими деформациями для горных пород, вязкое поведение которых может быть описано линейной ползучестью, представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^{ve} &= 1/3k_{ve}(2\varepsilon_i^e - \varepsilon_j^e - \varepsilon_k^e); \\ \gamma_{ij}^{ve} &= k_{ve}\gamma_{ij}^e, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_i^e, \varepsilon_j^e, \varepsilon_k^e, \gamma_{ij}^{ve}$  и  $\varepsilon_i^{ve}, \gamma_{ij}^{ve}$  — компоненты, соответственно, упругих и вязкоупругих деформаций;  $i, j$  и  $k$  — номера осей прямоугольной системы координат (принимают значения 1, 2 и 3).

Для условий одноосного сжатия цилиндрического образца с запрещением боковых деформаций компоненты деформаций образца могут быть представлены как сумма упругой и вязкоупругой составляющих

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^{ve}, \\ \varepsilon_r &= \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^{ve} = 0; \\ \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^{ve} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $z, r, \theta$  — оси цилиндрической системы координат;  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  — компоненты, соответственно, напряжений и деформаций;  $\varepsilon_r^{ve}, \varepsilon_\theta^{ve}, \varepsilon_z^{ve}$  — составляющие вязкоупругих деформаций. Поскольку в условиях осевой симметрии при отсутствии радиальных перемещений деформации и напряжения по направлениям осей  $r$  и  $\theta$  равны между собой, введем обозначения индексов: 1 — для оси  $z$ ; 2 — для осей  $r$  и  $\theta$ .

При монотонном росте давления на образец обеспечивается условие простого пути нагружения; в этом случае вязкоупругие сдвиговые деформации пропорциональны соответствующим упругим. Учитывая выражения (4), для вязкоупругих деформаций цилиндрического образца можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{ve} &= 2/3k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e); \\ \varepsilon_2^{ve} &= 1/3k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, для условий рассматриваемого эксперимента выражения (5) могут быть представлены в виде:  $\varepsilon_1^e + 2/3k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e) = \varepsilon_z; \varepsilon_2^e + 1/3k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e) = 0$ . Отсюда следует

$$\varepsilon_1^e = \frac{1 + 1/3k_{ve}}{1 + k_{ve}}\varepsilon_z; \varepsilon_2^e = \frac{1/3k_{ve}}{1 + k_{ve}}\varepsilon_z. \quad (7)$$

Поскольку напряжения определяются только упругими деформациями, то

$$\sigma_i = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}[\varepsilon_i(1 + \nu) + \nu(\varepsilon_j + \varepsilon_k)]. \quad (8)$$

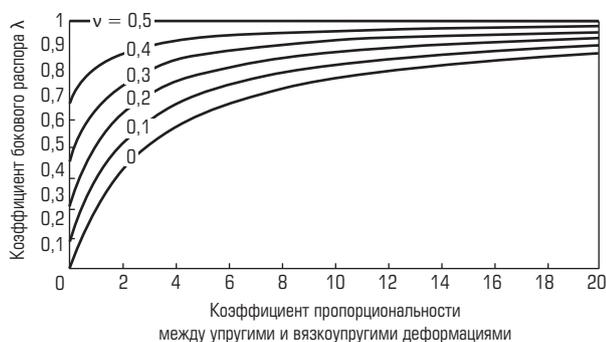
Другие компоненты напряжений получатся круговой перестановкой индексов, а именно: учитывая выражения (7), из (8) получим

$$\sigma_1 = E \frac{(1 - \nu)\varepsilon_1^e + 2\nu\varepsilon_2^e}{1 - \nu - 2\nu^2}; \sigma_2 = E \frac{\nu\varepsilon_1^e + \varepsilon_2^e}{1 - \nu - 2\nu^2}, \quad (9)$$

а с учетом (9) находим отношение боковых напряжений к осевым

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}. \quad (10)$$

На начальном этапе нагружения  $k_{ve} = \gamma^{ve}/\gamma^e = 0$ . В условиях длительного испытания при постоянном давлении на образец отношение  $\gamma^{ve}/\gamma^e$  будет асимптотически стремиться к некоторой величине, а значит, и отношение  $\sigma_1/\sigma_2$  будет стремиться к величине, отличающейся от  $\lambda_0$  (1). В процессе испытания образца отношение  $k_{ve} = \gamma^{ve}/\gamma^e$  растет, вместе с ним — отношение  $\sigma_1/\sigma_2$ . В массивах горных пород, когда процессы протекают в течение геологических периодов, это отношение достигнет максимальной величины, свойственной данной породе. Возникает вопрос, является ли предел отношения  $k_{ve} = \gamma^{ve}/\gamma^e$  при  $t \rightarrow \infty$  константой материала, или оно существенно зависит от напряженного состояния. Для пород, подчиняющихся закону линейной вязкости, предельная величина отношения  $k_{ve} = \gamma^{ve}/\gamma^e$  при  $t \rightarrow \infty$  названа коэффициентом упругой вязкости [13].



**Рис. 2. Зависимость коэффициента бокового распора от коэффициента упругой вязкости для пород с различными свойствами**

В массивах горных пород со спокойным залеганием слоев боковой распор  $\lambda$ , формирующийся в течение длительного времени, составит

$$\lambda = \frac{\nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}. \quad (11)$$

Из графиков, построенных по формуле (11), видно (рис. 2), 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  $\lambda_0$ . Так, при  $\nu = 0,2$  коэффициент бокового распора меняется от 0,25 до 0,63 при росте  $k_{ve}$  от 0 до 1. Для пластичных соляных или глинистых пород, вязкоупругие деформации которых могут быть больше упругих в 5–30 раз ( $k_{ve} = 2 \div 10$  и более), коэффициент бокового распора может превысить 0,6 даже при  $\nu = 0,1$ , а при  $\nu = 0,2$  — достичь и даже превзойти 0,9. По современным представлениям, в соляном массиве пород на глубине выемки полезных ископаемых 500–1000 м и более коэффициент бокового распора близок к единице. При  $\nu > 0,3$  и  $k_{ve} > 3$  рассчитанный по формуле (9) коэффициент  $\lambda > 0,8$ , что соответствует этим представлениям. Даже в скальных породах, у которых  $0,5 < k_{ve} < 1$  и  $0,2 < \nu < 0,3$ , коэффициент бокового распора, рассчитанный по формуле (11), находится в интервале 0,55–0,75, что существенно отличается от рассчитываемого с учетом только упругих деформаций бокового распора  $\lambda_0 = 0,25 \div 0,43$ .

Анализ керна Кольской сверхглубокой скважины показал [16], что до глубины 11,5 км среднее значение отношения действующих горизонтальных напряжений к вертикальным составляет около 0,777 и практически не зависит от глубины. Отклонения в 2–3 раза (а на отдельных глубинах — до 4 раз) действующих боковых напряжений от напряжений упругого распора автор анализа объясняет наличием тектонических сил, которые растут с глубиной по линейному закону. При этом установленное постоянство коэффициента бокового распора на Кольской сверхглубокой скважине подтверждает полученные автором результаты. При

$\nu = 0,25$  коэффициент упругого распора  $\lambda_0 = 0,333$ , что в 2,33 раза меньше установленной величины. По мнению автора, полученный в эксперименте результат объясняется проявлением вязких свойств пород и не нуждается в привлечении гипотезы тектонических сил. Приняв и подставив в формулу (11)  $\nu = 0,25$  при  $\lambda = 0,777$ , получим среднее по глубине предельное отношение вязкоупругих деформаций к упругим:  $\gamma^{ve}/\gamma^e = 3,21$ . 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 отношение вязкоупругих и упругих деформаций для основных пород в этом разрезе.

### Влияние тектонических деформаций на горизонтальные напряжения

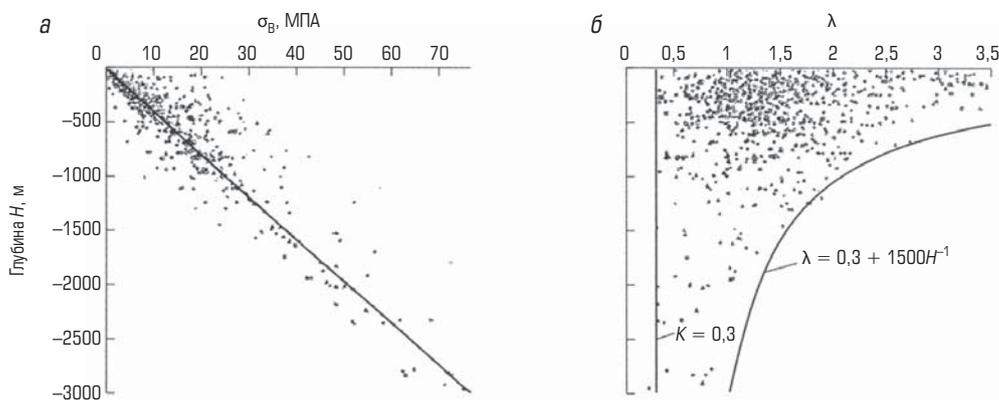
Взаимодействие тектонических плит, возникающее при движении верхних слоев литосферы, приводит к появлению так называемых тектонических напряжений. При взаимодействии тектонических плит относительно друг друга они деформируются, и появляются дополнительные напряжения. Поскольку напряжения зависят от жесткости материала, то правильнее говорить не о тектонических напряжениях, а о тектонических деформациях, распределение которых при известных направлениях подвижек можно получить из решения задач для плит с большей достоверностью, чем для напряжений. На рассматриваемом участке земной коры (в плане) могут быть определены главные (максимальные и минимальные в перпендикулярных направлениях) деформации, вызванные движением тектонических плит. Способы решения таких задач известны. В слоистом неоднородном массиве горных пород напряжения распределяются в зависимости от жесткости отдельных слоев, поэтому решение задач о распределении напряжений имеет смысл для отдельных слоев.

Для решения задачи о боковых напряжениях в части массива с известными значениями главных деформаций в горизонтальной плоскости использована прямоугольная система координат  $x, y, z$ . Ось  $z$  направлена по направлению сил тяжести, оси  $x$  и  $y$  — по направлениям главных деформаций  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  в горизонтальной плоскости. Как и ранее, исходили из того, что вязкие деформации горных пород ограничены — подчиняются закону, в котором модель деформирования не содержит включенного последовательно элемента течения Максвелла. Рассмотрен участок, на котором при наличии тектонических подвижек нет нарушений сплошности и складок. Горизонтальные деформации в этом случае представляют сумму упругих и вязких составляющих, равную тектоническим деформациям, обусловленным движением земной коры

$$\begin{aligned} \epsilon_x^e + \epsilon_x^{ve} &= t_x, \\ \epsilon_y^e + \epsilon_y^{ve} &= t_y, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $t_x$  и  $t_y$  — величины главных деформаций, вызванных тектоническими деформациями.

Решая систему уравнений (4), (8) и (12) относительно  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  и разделив результат на  $\sigma_z$ , получили выражения для отноше-



**Рис. 3. Компиляция мировых измерений напряжений, показывающая связь вертикальных напряжений (а) и коэффициента λ (б) с глубиной Н, м**

ния боковых напряжений к вертикальным по направлениям главных деформаций

$$\lambda_x = \frac{\nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)} + \frac{E}{\sigma_z} \frac{1/3k_{ve}(2t_x + t_y) + (t_x + \nu t_y)/(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}^2(1 + \nu) + 2/3k_{ve}(2 - \nu)}; \quad (13)$$

$$\lambda_y = \frac{\nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}(1 + \nu)} + \frac{E}{\sigma_z} \frac{1/3k_{ve}(2t_y + t_x) + (t_y + \nu t_x)/(1 + \nu)}{1 - \nu + 1/3k_{ve}^2(1 + \nu) + 2/3k_{ve}(2 - \nu)}$$

Первые слагаемые в формулах (13) совпадают с выражением для коэффициента бокового распора в статических условиях, т. е. величины боковых напряжений можно трактовать как суммы бокового распора и тектонических дополнений. Если порода обладает свойством деформироваться вязко неограниченно ( $k_{ve} \rightarrow \infty$ ), то, как следует из (13),  $\lambda_x = \lambda_y = 1$ . Когда вязкая деформация ограничена ( $\epsilon_i^v = \epsilon_i^{ve}$ ), что, по-видимому, имеет место в большинстве случаев, то боковые напряжения зависят от тектонических деформаций, могут быть меньше или больше напряжений бокового распора и превышать вертикальное давление.

Из формул (13) видно, что гравитационная часть коэффициента бокового распора не зависит от глубины, в то время как тектоническая часть уменьшается с глубиной. Поскольку эта часть коэффициента бокового распора обратно пропорциональна напряжениям  $\sigma_z$ , то, приближаясь к земной поверхности, эта часть может расти до любых больших величин. При этом напряжения по величине ограничены лишь условием предельного состояния по прочности пород. Из формул (13) следует также, что тектоническая часть в связи с ростом  $\sigma_z$  уменьшается обратно пропорционально глубине. О гиперболической зависимости коэффициента

бокового распора с тектонической составляющей от глубины свидетельствуют графики (рис. 3), построенные по результатам натурных измерений [17]. Тектонические напряжения в горизонтальной плоскости можно представить зависящими от главных тектонических деформаций в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_x &= E[k_1(\nu, K_{ve})t_x + k_2(\nu, K_{ve})t_y]; \\ T_y &= E[k_1(\nu, K_{ve})t_y + k_2(\nu, K_{ve})t_x], \end{aligned} \quad (14)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты влияния тектонических деформаций;

$$k_1 = \frac{2/3K_{ve} + \frac{1}{1 + \nu}}{1 - \nu + 1/3K_{ve}^2(1 + \nu) + 2/3K_{ve}(2 - \nu)}$$

$$k_2 = \frac{1/3K_{ve} + \frac{\nu}{1 + \nu}}{1 - \nu + 1/3K_{ve}^2(1 + \nu) + 2/3K_{ve}(2 - \nu)}$$

Представление о значениях этих коэффициентов и их зависимости от коэффициента упругой вязкости дают графики, рассчитанные при  $\nu = 0,2$  (рис. 4).

Тектонические деформации могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Горизонтальные напряжения могут превысить вертикальные, вызвать разрушения и складкообразования. В некоторых случаях появление растягивающих полных напряжений может привести к разрывам.

#### Напряженное состояние в неоднородных массивах

В массивах с негоризонтальным залеганием, неоднородностями и складками нет другого способа для определения поля напряжений, кроме математического моделирования. Экспериментальные замеры возможны в ограниченном количестве точек и могут быть использованы как тарировочные значения. Если при



**Рис. 4. Зависимость коэффициентов влияния тектонических деформаций  $k_1$  (1) и  $k_2$  (2) от коэффициента упругой вязкости при  $\nu = 0,2$**

горизонтальном залегании слоев пород не проявляются условия разрушения, то при наличии в горизонтальных плоскостях неоднородностей свойств и сложной гипсометрии такие условия могут возникать. Оставаясь в рамках гипотезы среды с ограниченными линейно вязкими деформациями и учитывая соотношения (4), получим следующие выражения, связывающие компоненты полных и упругих деформаций:

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= (1 + 2/3K_{ve})\epsilon_i^e - 1/3K_{ve}\epsilon_j^e - 1/3K_{ve}\epsilon_k^e; \\ \gamma_{ij} &= (1 + K_{ve})\gamma_{ij}^e, \quad (i, j, k = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (15)$$

Подставив в формулы (15) выражения для упругих деформаций через напряжения, получим:

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= \frac{1 + 2/3K_{ve}(1 + \nu)}{E} [\sigma_i - \frac{\nu + 1/3K_{ve}(1 + \nu)}{\nu + 2/3K_{ve}(1 + \nu)} (\sigma_j + \sigma_k)], \\ \gamma_{ij} &= \frac{\tau_{ij}(1 + K_{ve})}{G}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $G$  — модуль сдвига.

Формулы (15) и (16) могут быть представлены в виде выражений, определяющих связь напряжений и деформаций в линейно-упругих средах:

$$\epsilon_i = \frac{1}{E} [\sigma_i - \nu_1(\sigma_j + \sigma_k)], \quad \gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{G_1}, \quad (17)$$

где

$$E_1 = \frac{E}{1 + 2/3K_{ve}(1 + \nu)}, \quad \nu_1 = \frac{\nu + 1/3K_{ve}(1 + \nu)}{\nu + 2/3K_{ve}(1 + \nu)}, \quad G_1 = \frac{G}{1 + K_{ve}}$$

— квазиупругие постоянные: соответственно модули продольной и поперечной деформаций и модуль сдвига.

Таким образом, напряжения массива горных пород вне зон тектонических разрывов могут быть рассчитаны от действия собственного веса в упругой среде, в которой роль упругих модулей играют величины, зависящие от упругих и вязких параметров.

В зонах неоднородностей механических свойств пород может сформироваться напряженное состояние, при котором в течение длительного времени в породах возникнут условия для нарушения прочности. В таких случаях необходимы специальные подходы, учитывающие возможные ситуации. Первичная трещиноватость осадочных (литогенетические трещины) и изверженных пород не зависят от напряжений; при моделировании эти дефекты среды должны задаваться в исходных данных о свойствах пород.

### Заключение

На основе анализа вязких свойств, в разной степени присущих всем горным породам, получено выражение для бокового распора в массиве пород с учетом упругих и вязкоупругих деформаций. В пределах глубин инженерной деятельности в неоднородном массиве пород со слоями с различными упругими и вязкими свойствами боковой распор меняется скачками от слоя к слою. В слоях пород с одинаковыми свойствами боковой распор не зависит от глубины. Например, 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 вязких свойств и, как следствие, слабой проницаемости. Вне зон тектонических разрывов и складок отсутствуют условия предельного напряженного состояния, влияющие на формирование напряжений бокового распора в массиве пород. В раздельно-блочных и сыпучих массивах боковой распор определяется как свойствами сухого трения контактов, так и вязкостью. При этом он формируется в зависимости от упругих и вязких свойств с ограничением по условию сухого трения.

В общем случае боковой распор в массиве горных пород формируется из двух частей — гравитационной и тектонической. Гравитационная часть напряжений бокового распора зависит от упругих и вязкоупругих свойств пород и растет вместе с глубиной. Тектоническая составляющая напряжений в горизонтальной плоскости возникает вследствие деформаций взаимодействующих тектонических плит и не зависит от глубины. Тектонические напряжения могут быть рассчитаны в зависимости от главных деформаций, вызванных тектоническими подвижками.

При достижении боковыми напряжениями некоторых величин в слоях пород могут возникать тектонические разрывы и складки, в некоторых случаях — условия активизации существующих разрывов.

Предложенные и представленные в настоящей статье подходы к расчету начального поля напряжений в массиве горных пород с большей полнотой учитывают их свойства и строение, обеспечивая более высокую точность, чем существующие методы, при принятии инженерных решений, в том числе о граничных и начальных условиях в постановках задач при математическом моделировании.

## Библиографический список

1. Леонтьев А. В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии // ФТПРПИ. 2001. № 1. С. 31–40.
2. Макаров А. Б. Практическая геомеханика. — М.: Горная книга, 2006. — 391 с.
3. Kasparyan E., Fedotova I. Stress-strain state in the rock mass of the Khibiny deposits and tasks of geodynamical zoning / Proceedings 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 — Albena, Bulgaria. June 16–25, 2015. Book 1. Vol. 2. P. 759–766.
4. Barnasch J., Beer W. Aerogeofizikalische Messungen im Werra — Kaligebeit // Kali und Steinsalz. 2012. Heft 1. S. 12–23.
5. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. — М., 1969. Т. 2. — 864 с.
6. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 204 с.
7. Sheorey P. R., Murali Mohan G., Sinha A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress // Int. J. Rock Mech. Min Sci. 2001. Vol. 38, P. 1211–1216.
8. Крупенников Г. А., Филатов Н. А., Амосин Б. З., Барковский В. М. Распределение напряжений в породных массивах. — М., 1972. — 143 с.
9. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л., 1977. — 213 с.
10. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. — СПб., 1999. — 190 с.
11. Ребецкий Ю. Л. О возможном механизме генераций в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // Доклады АН. 2008. Т. 423. № 4. С. 538–542.
12. Kozyrev A. A., Savchenko S. N. Distribution relations of tectonical stresses in the upper part of the Earth's crust // News of the solid Earth. 2009. Vol. 45. No. 11. P. 964–972.
13. Оловянный А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. — СПб.: ИПК «Коста», 2012. — 280 с.
14. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. — М., 1979. — 269 с.
15. Глушко В. Т., Виноградов В. В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. — М.: Недра, 1982. — 191 с.
16. Савченко С. Н. Оценка напряженного состояния горных пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины // ФТПРПИ. 2004. № 1. С. 27–34.
17. Brady B., Bawn E. Rock Mechanics for Underground mining. 3 ed. — Kluwer Academic Publishers, 2004. — 688 p. 

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 4, pp. 25–31  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.05>

## Lateral earth pressure and tectonic stresses in the mine rock massif

## Information about author

A. G. Olovyanyni<sup>1</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, agolov2009@hgepro.ru

<sup>1</sup> VNII Galurgy Stock Co., St.-Petersburg, Russia

## Abstract

Stressed state in a rock massif is a most important factor affecting processes around mine workings. Methods used for calculating the stresses and based on the hypotheses of resilient earth pressure or hydrostatic state do not consider the time processes developing under formation of stress field. Within the depths of engineering in a heterogeneous massif of rocks with layers with different elastic and viscous properties the lateral earth pressure irregular changes from layer to layer. In the layers of rocks with similar properties lateral earth pressure does not depend on the depth. In the clay or salt layers stress state is close to hydrostatic, due to their viscous properties and, consequently, poor permeability. Outside the zones of tectonic fractures and folds are no conditions limiting stressed state, affecting the formation of lateral earth pressure stresses in the rock massif. In the separately-block and granular massifs lateral earth pressure is determined by the properties of dry-contact friction and viscosity. In this case it is formed according to the elastic and viscous properties with a restriction on the condition of dry friction. In general, the lateral earth pressure in a rock mass is formed of two parts – the gravitational and tectonic. The gravitational part of stresses of the lateral earth pressure depends on the elastic and viscous and elastic properties of rocks and grows with depth. Tectonic component of stresses in a horizontal plane occurs due to deformation of interacting tectonic plates and is not dependent on the depth. Tectonic stresses can be calculated according to the main deformation caused by tectonic movements. Upon reaching the lateral stresses certain values in the layers of rock can occur tectonic fractures and folds, in some cases – the conditions of activation of the existing fissures. Forming of stressed state is being affected by resilient, viscous and strength properties of rocks. Relationships between stressed state forming and effect of resilient, viscous and strength properties in solid, separately blocked and loose rocks have been considered. Also the problem of tectonic stresses acting in rock massifs under the influence of tectonic plates' mutual displacement is considered. The relationships for additional stresses in a rock massif depending on tectonic plates' deformations have been obtained. Methods for evaluation of stressed state in a rock massif have been shown which differ from those adopted at present.

**Keywords:** Rock massifs, stressed state, gravitation and tectonic stresses, side (lateral) thrust, elastic and visco-elastic deformations (strains), discontinuity in a massif, initial and boundary conditions.

## References

1. Leontev A. V. Analiz estestvennykh napryazheniy po rezul'tatam izmereniy v rudnikakh na territorii Severnoy Evrazii (Analysis of natural stresses according to the results of

measurements in Northern Europe mines). *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2001. No. 1. pp. 31–40.

2. Makarov A. B. *Prakticheskaya geomekhanika* (Practical geomechanics). Moscow : Gornaya Kniga, 2006. 391 p.
3. Kasparyan E., Fedotova I. Stress-strain state in the rock mass of the Khibiny deposits and tasks of geodynamical zoning. Proceedings 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 – Albena, Bulgaria. June 16–25, 2015. Book 1, Vol. 2. pp. 759–766.
4. Barnasch J., Beer W. Aerogeofizikalische Messungen im Werra – Kaligebeit. Kali und Steinsalz. 2012. Heft 1. ss. 12–23.
5. Nadai A. *Plastichnost i razrushenie tverdykh tel* (Plasticity and failure of ore bodies). Moscow, 1969. Vol. 2. 864 p.
6. Baryakh A. A. Konstantinova S. A., Asanov V. A. *Deformirovanie solyanykh porod* (Salt rock deformation). Ekaterinburg : Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 1996. 204 p.
7. Sheorey P. R., Murali Mohan G., Sinha A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2001. Vol. 38. pp. 1211–1216.
8. Krupennikov G. A., Filatov N. A., Amusin B. Z., Barkovskiy V. M. *Raspredelenie napryazheniy v porodnykh massivakh* (Stress distribution in rock massifs). Moscow, 1972. 143 p.
9. Markov G. A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* (Tectonic stresses and rock pressure in Khibiny massif mines). Leningrad, 1977. 213 p.
10. Petukhov I. M., Batugina I. M. *Geodynamika neдр* (Soil geodynamics). Saint Petersburg, 1999. 190 p.
11. Rebeckiy Yu. L. O vozmozhnom mekhanizme generatsiy v zemnoy kore gorizontalnykh szhimayushchikh napryazheniy (About the possible mechanism of generations of horizontal compression stress in Earth's crust). *Doklady Akademii Nauk = Reports of Academy of Sciences*. 2008. Vol. 423, No. 4. pp. 538–542.
12. Kozyrev A. A., Savchenko S. N. Distribution relations of tectonical stresses in the upper part of the Earth's crust. News of the solid Earth. 2009. Vol. 45, No. 11. pp. 964–972.
13. Olovyanyn A. G. *Mekhanika gornykh porod. Modelirovanie razrucheniy* (Rock mechanics. Failure modeling). Saint Petersburg : Kosta, 2012. 280 p.
14. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost i deformiruemost gorbykh porod* (Durability and deformability of rocks). Moscow, 1979. 269 p.
15. Glushko V. T., Vinogradov V. V. *Razrushenie gornykh porod i prognozirovaniye proyavleniy gornogo davleniya* (Rock failure and forecasting of rock pressure). Moscow : Nedra, 1982. 191 p.
16. Savchenko S. N. Otsenka napryazhennogo sostoyaniya gornykh porod v raione bureniya Kolskoy sverkhglubokoy skvazhiny (Assessment of stressed state of rocks in the region of drilling of Kola ultra-deep well). *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2004. No. 1. pp. 27–34.
17. Brady B., Bawn E. Rock Mechanics for Underground mining. Third edition. Kluwer Academic Publishers, 2004. 688 p.