

УДК 622.833.5

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ КОЛЬЦЕВОЙ РАЗГРУЗКИ



Н. А. БЕЛЯКОВ¹,
доцент,
канд. техн. наук



К. В. МОРОЗОВ²,
зав. лабораторией,
канд. техн. наук



И. А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹,
аспирант,
emelyanov_ia@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Современное состояние горнодобывающей промышленности осложняется факторами и неопределенностями, которые формируют ряд нерешенных задач, связанных с прогнозом напряженно-деформированного состояния крепей подземных сооружений и горного массива, устойчивостью горных выработок, расчетом безопасных параметров конструктивных элементов систем разработки месторождений и т. д. Для решения поставленных задач, а именно для формирования достоверного геомеханического прогноза, применяют подход, основанный на выборе корректной геомеханической модели, способной отразить свойства и поведение исследуемого массива. В работе [1] представлена методика прогноза напряженно-деформированного состояния впереди поверхности забоя при различных величинах отпора временной крепи. Созданная численная модель корректно учитывает поведения грунта и технологию проведения тоннеля. В исследовании [2] рассмотрена задача в объемной постановке, в рамках которой выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния участков комбинированной крепи глубокого вертикального ствола, пройденного в соляных породах. М. А. Карасевым и Р. О. Сотниковым проведена оценка сейсмического воздействия на напряженно-деформированное состояние набрызг-бетонной крепи. Процессы деформирования породного массива и бетона описаны моделями, основанными на условии пластичности Хука – Брауна и Concrete Damage Plasticity (CDP) [3]. В работе [4] представлен комплексный геомеханический подход для оценки опасности горных ударов. Геомеханическая модель выполнена

Представлена методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки, включающая в себя многовариантное численное моделирование и аналитический расчет. Основную задачу многовариантного численного моделирования – получение зависимостей смещений и деформаций стенок измерительной скважины – решают в пространственной постановке с использованием упругой модели поведения горного массива. Аналитический расчет проводят в рамках законов теории упругости.

Ключевые слова: горный массив, естественное напряженное состояние, геомеханический прогноз, численное моделирование, аналитический расчет, смещения, кольцевая разгрузка

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13

в программном комплексе FLAC^{3D} 7.0 в виде упрощенных объемных упругих стеновых панелей на исследуемой глубине. В исследовании А. А. Козырева и др. на основе разработанных конечно-элементных моделей выполнены анализ и сравнение двух систем разработки: с поэтажным и этажным обрушением [5]. М. А. Карасевым и Т. Т. Нгуеном выполнена количественная оценка влияния геометрических параметров тоннеля на напряженно-деформированное состояние его обделки. Предложен алгоритм проведения многовариантного анализа влияния форм тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки [6]. В работе А. Г. Протосени и М. А. Вильнер на основе методов численного моделирования изучено поведение дисперсно-армированного набрызг-бетона с различными механическими характеристиками. Представлены зависимости несущей способности крепи от характеристик бетона в различных условиях, а также проанализирована остаточная прочность [7]. В исследовании И. И. Айнбиндера и О. В. Овчаренко рассмотрена технология отработки запасов рудника «Интернациональный» с использованием защитного замкнутого гидроизолирующего кольца в опасной зоне, что обеспечивает устойчивость конструкций и безопасность ведения горных работ. Оценка напряженно-деформированного состояния горного массива основывается на математическом моделировании [8]. В работе [9] выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи шахтного ствола, расположенного на границе двух геологических разностей. Поставленную задачу решали на основе численного моделирования в пространственной постановке. А. Г. Протосеней и М. А. Вильнер на основании трехмерного численного моделирования в программном комплексе 3DEC

осуществлен прогноз напряженно-деформированного состояния горных выработок в местах их сопряжения. Модели, верифицированные на основе натуральных данных, продемонстрировали существенную разницу с применяемыми эмпирическими методиками [10]. В работе [11] авторами предложен подход к моделированию механического поведения соляных пород с учетом их макроструктурных особенностей, который позволит повысить достоверность прогнозирования поведения горной массы вокруг строящихся объектов в солях. В. Л. Трушко с соавторами представили метод прогнозирования прочностных характеристик трещиноватого горного массива апатит-нефелиновых руд, основанный на численном моделировании с учетом блочности в явном виде [12]. В исследовании [13] предложена методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения в соляных породах. Разработанная численная модель учитывает вязкопластическое деформирование солей; крепь вертикального ствола рассматривается как двухслойная среда: внутренний слой – бетон, внешний – компенсационный материал. В. А. Еременко продемонстрировал результаты научно-исследовательской работы по воссозданию напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы подземного рудника на основании численного моделирования в программном комплексе MAP3D. Модели в представленной работе откалиброваны с использованием данных картирования горного массива и программ Dips и RocData [14]. В работе [15] приведены способы информационного моделирования для прогнозирования поведения горного сооружения на протяжении всего срока службы. Описаны перспективы использования информационных моделей объектов горных предприятий и горных выработок для календарного планирования работ и оптимизации проектов разработки месторождения.

Однако не менее значимым является знание естественного напряженного состояния горного массива. Определение величин и направлений главных напряжений необходимо на всех этапах эксплуатации горного предприятия, так как это позволит снизить экономические затраты при проходке горных выработок, повысить уровень безопасности при работе в подземных условиях и улучшить достоверность геомеханического прогноза в целом. Научным сообществом разработаны методы оценки естественного напряженного состояния горного массива, которые совершенствуются в настоящее время. На основании механизма определения параметров естественного напряженного состояния горного массива можно выделить три основные группы данных методов: первая – геомеханические, основанные на изменении степени деформирования горного массива в месте проведения измерений; вторая – геофизические, определяющие взаимосвязь между физическими полями и напряжениями, действующими в горном массиве; третья – геологические, анализирующие общую геологическую обстановку исследуемого участка. В работе [16] дан обзор большого числа геомеханических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива,

подчеркнута важность определения параметров напряженного поля и последующего численного моделирования. В исследовании W. Petr и др. приведен метод компактной конической скважины (ССВО) для определения естественного напряженного состояния горного массива с помощью тензометрических датчиков. Особенностью данного метода является отсутствие этапа обустройства измерительной скважины [17]. В работе [18] проведена оценка естественного напряженного состояния горного массива на месторождении в Южном Китае. Для определения значений компонент напряженного состояния был проведен ряд испытаний на гидроразрыв пласта, данные которых использованы в виде исходного поля напряжений при построении объемной геомеханической модели месторождения. В исследовании [19] представлена комплексная оценка характеристик напряженного поля горного массива в окрестности гидроэлектростанции в Северной Португалии, включающая в себя 19 гидравлических испытаний (испытания на гидроразрыв) в двух вертикальных скважинах глубиной 500 м и 12 испытаний с использованием плоских домкратов. В работе A. Saeidi и др. рассмотрены три различные методики оценки естественного напряженного состояния горного массива в условиях шахты Niobec (Квебек, Канада) [20]. В исследовании [21] описан подход по определению деформаций точек однородных изотропных твердых тел с применением деформационной тензорозетки, предложен новый метод тензометрирования, позволяющий решить некоторые задачи механики сплошной среды. В работе B. Shen и др. на основе полевого мониторинга и трехмерного численного моделирования проведена комплексная оценка напряженного состояния угольного массива вблизи дайки на австралийской угольной шахте [22]. G. Scelsi и др. представлена аналитическая методика оценки напряженного состояния горного массива на основе данных бурения измерительных скважин [23]. В исследовании [24] представлена методика оценки естественного напряженного состояния горного массива, основанная на измерении смещений пилотной скважины акустической камерой. В работе Е. Пудова и др. проведено комплексное исследование угольного массива с применением комбинации геофизических методов. Установлена взаимосвязь между проявлениями горно-геологических процессов в подготовительных выработках и параметрами электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии [25]. В исследовании Е. А. Баженовой рассмотрены результаты оценки активности дизъюнктивных тектонических нарушений на территории железорудного месторождения методами, основанными на регистрации сигналов электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии [26]. Е. Л. Сосновской и А. Н. Авдеевым представлена методика анализа степени разрушенности керна исследовательских скважин с целью выявления потенциально удароопасных пород и оценки устойчивости горных выработок [27]. В работе [28] исследованы фундаментальные закономерности акустической эмиссии в мерзлых грунтах с целью количественной

оценки напряженно-деформированного состояния и параметров устойчивости горного массива. В исследовании [29] приведена методика оценки естественного напряженного состояния горного массива на основе каротажа нефтяных скважин между глубинами 1600 и 2240 м на месторождении Курдистана (Ирак).

Проведенный анализ литературных источников позволил сделать вывод о том, что для обеспечения достоверного геомеханического прогноза необходимо корректно подобрать геомеханическую модель поведения материалов и определить параметры естественного напряженного состояния горного массива, соответствующие действительности. В настоящее время основное число работ посвящено исследованию первого фактора, однако разрабатываются и совершенствуются методы оценки естественного напряженного состояния горного массива, наиболее представительными из которых являются геомеханические методы, а именно методы, связанные с разгрузкой массива скважинами. Они позволяют провести как качественную, так и количественную оценку естественного напряженного состояния горного массива. Однако процесс обработки данных натурных измерений достаточно трудоемкий, неоднозначный и крайне скупо освещается в научной литературе. В связи с этим целью настоящей работы является представление подробной информации о методике обработки данных полевых испытаний при оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки.

Полевые испытания

Метод кольцевой разгрузки (overcoring) заключается в измерении смещений стенок измерительной (пилотной) скважины в результате ее обурирования кольцевой (разгрузочной) щели. Данный процесс предполагает упругое восстановление элемента горного массива при нарушении его связи с окружающим массивом. В качестве исследовательского оборудования использован многокомпонентный датчик смещений, высокочувствительные элементы которого измеряют смещения стенок пилотной скважины в девяти различных направлениях [30].

Основные этапы выполнения полевых испытаний представлены на **рис. 1**.

Лабораторные испытания кернового материала

В ходе проведения полевых испытаний на этапе бурения измерительной скважины отбирают керновый материал на каждом интервале измерений для последующих лабораторных испытаний по определению деформационно-прочностных свойств. Сущность данных испытаний заключается в измерении сжимающей силы, которую прикладывают к торцам образца цилиндрической формы, продольных и поперечных деформаций, формирующихся в результате силового воздействия. Подробно методика лабораторных исследований приводится в соответствующих ГОСТах [31, 32] или рекомендациях ISRM [33].

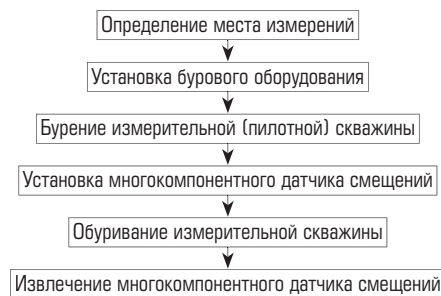


Рис. 1. Основные этапы выполнения полевых испытаний

Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива

Представленная методика предполагает подбор параметров начального напряженного состояния горного массива, обеспечивающего деформации стенок измерительной скважины после создания разгрузочной (кольцевой) щели, которая соответствует полевым исследованиям. Исходя из этого, можно выдвинуть предположение о том, что подобранные начальные (естественные) напряжения действовали во вмещающем горном массиве до ведения горных работ.

На основании проведенных полевых испытаний по измерению смещений стенок пилотной скважины и полученных деформационно-прочностных свойств кернового материала выполняют обработку полученных данных, основанную на двух подходах: численном моделировании и аналитическом расчете. На **рис. 2** представлены основные этапы обработки данных.

Численное моделирование

Начальным этапом при обработке данных полевых испытаний в предлагаемой методике является создание численной модели (**рис. 3**), основная задача которой — получение зависимостей смещений и деформаций стенок пилотной скважины. Поставленную задачу решают в пространственной постановке с использованием упругой модели поведения материала, что позволит определить прямые зависимости искомых величин. Представленная модель разработана в программном комплексе Abaqus CAE и отражает основные этапы полевых исследований:

- формирование начального напряженного состояния горного массива;
- проходка горной выработки;
- бурение измерительной (пилотной) скважины;
- формирование разгрузочной (кольцевой) щели.

Проходку горной выработки, бурение измерительной (пилотной) скважины, формирование измерительной (кольцевой) щели моделируют обнулением жесткости конечных элементов в пределах их геометрии.

В предлагаемой методике рассматривается выработка типового сечения с прямоугольно-сводчатой формой высотой 5 м и пролетом 5,3 м. Параметры исследовательской



Рис. 2. Основные этапы обработки данных

скважины (измерительной скважины и кольцевой щели) обусловлены характеристиками измерительного оборудования и представлены на **рис. 4**. Устье исследовательской скважины расположено на высоте 1,6 м от почвы выработки. Глубина измерения составляет 10 м.

Исходными данными для создания численной модели являются деформационно-прочностные характеристики горного массива, полученные в результате проведения лабораторных испытаний. Однако существует ряд неопределенностей, связанных с оценкой деформационно-прочностных свойств горного массива, а именно переход от свойств, полученных в результате испытания кернового материала, к свойствам реального массива. В работе [34] проведен сравнительный анализ различных рейтинговых систем перехода от свойств образца к свойствам массива, учитывающий деформационные и прочностные свойства образца. На основании кривых, представленных в работе [34], были получены исходные данные для дальнейших исследований: удельный вес $0,0306 \text{ МН/м}^3$; модуль упругости массива $25157,7 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $0,3$.

Начальное напряженное состояние вмещающего горного массива формируют путем задания нормальных и касательных компонент тензора напряжений. Настоящая методика предполагает многовариантное численное моделирование с изменением следующих параметров: коэффициента бокового давления ($\lambda_1 = 0,5; \lambda_2 = 1; \lambda_3 = 2; \lambda_4 = 3$) и угла поворота главных напряжений ($\theta_1 = 0^\circ, \dots, \theta_{10} = 90^\circ$, с шагом 10°). Данная вариативность позволяет получить необходимое число значений смещений и деформаций стенок измерительной скважины.

Многокомпонентный датчик смещений дает возможность измерить перемещения стенок пилотной скважины в девяти различных направлениях. Восемь измерительных точек (направлений) указаны на **рис. 4**. Направления 1, 3, 5, 7 соответствуют линейным деформациям, а 2, 4, 6, 8 – угловым. Девятое измерительное направление всегда перпендикулярно оси горной выработки (соосно пилотной скважине), в которой проводят исследовательские работы.

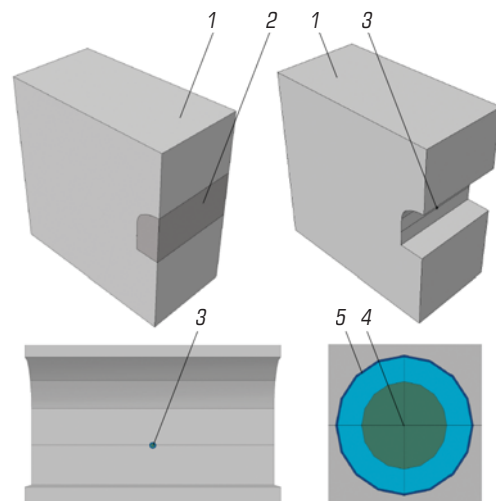


Рис. 3. Численная модель:

1 – горный массив; 2 – горная выработка; 3 – исследовательская скважина; 4 – измерительная скважина; 5 – разгрузочная (кольцевая) щель

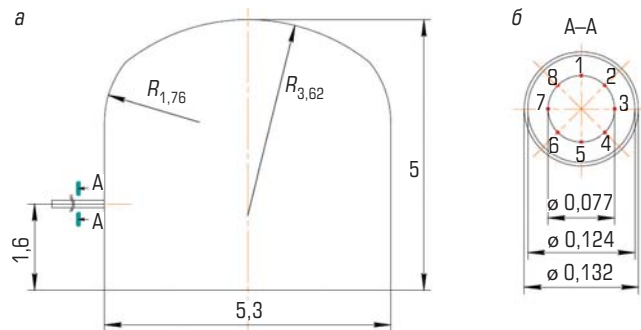


Рис. 4. Исследовательская скважина в шахтных условиях (а) и схема и размеры горной выработки и измерительной скважины (б), м:

1–8 – места измерения смещения стенок пилотной скважины; $R_{1,76}$ и $R_{3,62}$ – радиусы боковой и осевой дуг свода горной выработки

Примером многовариантного численного моделирования являются зависимости смещений и деформаций стенок измерительной скважины, представленные на **рис. 5**.

В настоящей работе приведены зависимости по первому и второму направлениям, радиальные смещения стенок измерительной скважины по которым соответствуют линейным и угловым деформациям. Аналогичные зависимости отстраиваются для оставшихся направлений.

Аналитический расчет

Предлагаемая методика действует в рамках теории упругости, так как основой метода кольцевой разгрузки (overcoring) является процесс упругого восстановления элемента после

обуривания, т. е. отделения от основного горного массива. Следовательно, компоненты напряжений и деформаций имеют линейное соотношение, описываемое законом Гука.

На основании предложенных ранее зависимостей и измеренных значений смещений стенок пилотной скважины на этапе полевых исследований определяют все компоненты линейных и угловых деформаций, представленные в виде матрицы (тензор деформаций) [35]:

$$T_{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \epsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \epsilon_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ – линейные деформации; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{zy}$ – угловые деформации.

Исходя из того, что в предлагаемой методике задачу по определению естественного напряженного состояния горного массива решают в объемной постановке, тело подвергают воздействию трех нормальных напряжений, которые определяют на основании закона Гука путем решения системы уравнений [35]:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]}{E} \\ \epsilon_y = \frac{[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]}{E} \\ \epsilon_z = \frac{[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]}{E} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Помимо нормальных напряжений, рассчитывают касательные напряжения, необходимые для определения главных напряжений и их ориентации [35]:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}; \gamma_{yx} = \frac{\tau_{yx}}{G}; \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}; \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}; \gamma_{zy} = \frac{\tau_{zy}}{G}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ – касательные напряжения; G – модуль сдвига.

Также необходимо отметить, что для напряженного состояния справедлив закон парности касательных напряжений, следовательно $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$. На основании полученных значений решают характеристическое (кубическое) уравнение, корнями которого являются главные напряжения [35]:

$$\sigma_i^3 - J_1\sigma_i^2 + J_2\sigma_i - J_3 = 0, \quad (4)$$

где σ_i – главные напряжения, $i = 1, 2, 3$; J_1, J_2, J_3 – коэффициенты, характеризующие линейные и касательные напряжения:

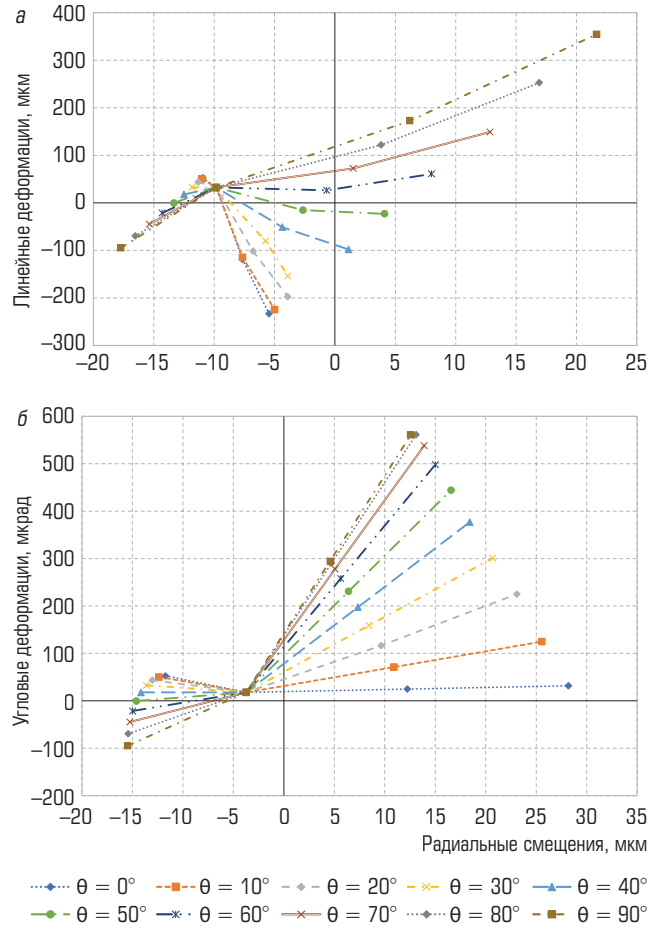


Рис. 5. Зависимости радиальных смещений и линейных деформаций (а), а также угловых деформаций (б) стенок измерительной скважины

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \\ J_2 &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2; \\ J_3 &= \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Завершающим этапом аналитического расчета является определение направляющих косинусов главных напряжений, т. е. их ориентация в пространстве [35]:

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma_i)l_i + \tau_{xy}m_i + \tau_{xz}n_i = 0 \\ \tau_{yx}l_i + (\sigma_y - \sigma_i)m_i + \tau_{yz}n_i = 0 \\ \tau_{zx}l_i + \tau_{zy}m_i + (\sigma_z - \sigma_i)n_i = 0 \\ l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где l_i, m_i, n_i – направляющие косинусы площадок, в которых действуют главные напряжения относительно площадок, в которых действуют нормальные напряжения, $i = 1, 2, 3$.

Необходимо пояснить, что система уравнений (6) является избыточной (четыре уравнения при трех неизвестных). Следовательно, для определения направляющих косинусов отбрасывается одно из трех первых равенств.

Обсуждение результатов

Полевые измерения проводят на одной исследовательской скважине по нескольким причинам: первая – многокомпонентный датчик смещений предоставляет данные о перемещениях стенок пилотной скважины в девяти различных направлениях, что является достаточным для последующего получения полного тензора деформаций и тензора напряжений; вторая – трудоемкость и сложность проведения ряда буровых и измерительных работ, а именно бурение вертикально направленной скважины (в кровле выработки) и установка измерительного оборудования. Однако на этапе численного моделирования разрабатываемые модели учитывают все три направления исследовательской скважины (вдоль каждой оси X, Y, Z). Вышеуказанное необходимо для того, чтобы заполнить тензор деформаций и далее перейти к тензору напряжений. Также необходимо отметить, что в предлагаемой методике измерения проводят на расстоянии до 10 м от борта выработки. Данный параметр обусловлен несколькими факторами, один из которых – это типоразмер и характеристики применяемого бурового и измерительного оборудования. При превышении описываемой глубины измерения возникают следующие сложности: нарушается прямолинейность трассы пилотной скважины, а следовательно, пропадает ортогональность между осью скважины и осью выработки, что недопустимо; возникают проблемы с установкой и позиционированием многокомпонентного датчика смещений, чувствительные элементы которого должны быть расположены строго под установленными углами (проверяют в момент калибровки измерительного оборудования); осложняется извлечение кернового материала. Необходимо отметить, что в расчетах учитывают влияние горной выработки. На **рис. 6** представлены зависимости изменения радиальных смещений и линейных деформаций стенок по трассе пилотной скважины.

В данном примере рассмотрен вариант для измерительного направления 1, угол поворота главных напряжений $\theta = 0^\circ$. Однако зависимости, отстроенные по оставшимся направлениям и углам поворота главных компонент напряжений, имеют аналогичный характер. На полученных зависимостях представлена зона влияния горной выработки, составляющая 0,8, что соответствует 6,6 м (ширина выработки 5,3 м).

На основании предлагаемой методики далее будет рассмотрен пример обработки данных полевых исследований (измерение смещения стенок пилотной скважины).

В ходе полевых исследований апатит-нефелинового горного массива были проведены измерения смещений стенок пилотной скважины на расстоянии 0,7 м от устья скважины. Далее на основании зависимостей, представленных на рис. 6, был выполнен их пересчет для глубины 10 м (**табл. 1**). Деформационно-прочностные свойства определены по результатам лабораторных испытаний кернового материала с последующим переходом к свойствам реального массива и составляют: $E = 19725,3$ МПа – модуль упругости; $\nu = 0,34$ – коэффициент Пуассона; $\gamma = 0,0256$ МН/м³ – удельный вес. Размеры

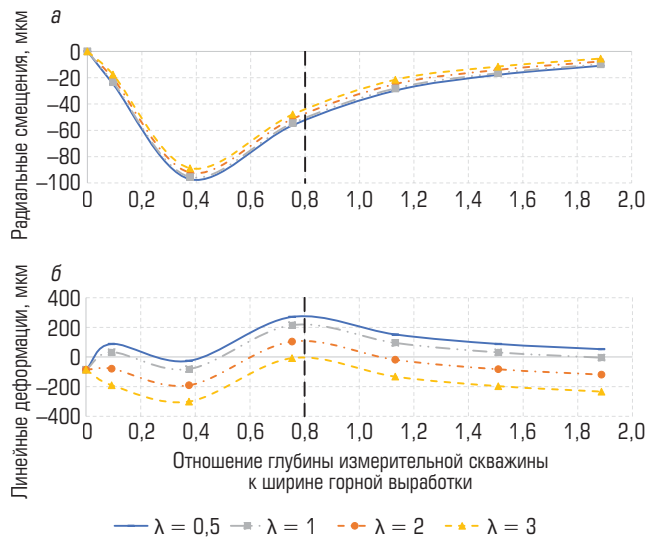


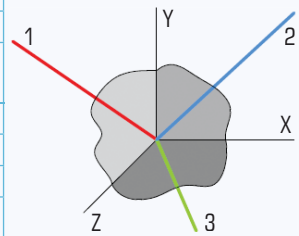
Рис. 6. Зависимости изменения радиальных смещений (а) и линейных деформаций (б) стенок по трассе пилотной скважины

Таблица 1. Смещения стенок пилотной скважины

Направление	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Смещение, мкм	40	20	30	20	10	43	68	60	18

Таблица 2. Направляющие косинусы площадок, в которых действуют главные напряжения

Направляющие косинусы наибольшего главного напряжения	
l_1	0,9593
m_1	0,1481
n_1	0,2401
Направляющие косинусы среднего главного напряжения	
l_2	0,0317
m_2	0,7862
n_2	0,617
Направляющие косинусы наименьшего главного напряжения	
l_3	0,2793
m_3	0,5957
n_3	0,753



Пр и м е ч а н и е. 1, 2, 3 – главные напряжения, сориентированные относительно исходной системы координат.

выработки и исследовательской скважины приняты аналогичными размерам, представленным на рис. 4.

На основании зависимостей, приведенных на рис. 5 (для всех направлений измерений и описанного ранее диапазона коэффициентов бокового давления), а также уравнений (2) и (3) определены линейные и угловые деформации, нормальные и касательные напряжения, представленные в виде тензоров:

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1480 & 185 & 396 \\ 185 & 252 & 855 \\ 396 & 855 & 485 \end{pmatrix}, \text{ мкм, мкрад;}$$

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} 56,4 & 1,4 & 2,9 \\ 1,4 & 38,4 & 6,3 \\ 2,9 & 6,3 & 41,8 \end{pmatrix}, \text{ МПа.}$$

После решения характеристического уравнения (4) получены значения главных напряжений: $\sigma_1 = 57,4$ МПа; $\sigma_2 = 45,7$ МПа; $\sigma_3 = 33,5$ МПа.

На заключительном этапе расчета определена ориентация полученных напряжений посредством нахождения направляющих косинусов площадок, в которых действуют главные напряжения относительно площадок, в которых действуют нормальные напряжения. Значения направляющих косинусов представлены в **табл. 2**.

Заключение


В настоящей работе представлена методика по оценке естественного напряженного состояния горного массива,

включающая в себя полевые исследования, лабораторные испытания, численное моделирование и аналитический расчет. Более подробно описан алгоритм обработки данных, основанный на двух последних подходах.

Численное моделирование подразумевает многовариантность расчетов, на основании которых формируют зависимости значений смещений и деформаций стенок пилотной скважины. Исходя из полученных линейных и угловых деформаций, проводят аналитический расчет главных напряжений, а также их направляющих косинусов, что определяет ориентацию главных напряжений на исследуемом участке, которые, в свою очередь, формируют естественное напряженное состояние горного массива.

В дальнейшем на основании приведенной методики будет рассмотрено влияние тектонических нарушений на параметры естественного напряженного состояния горного массива.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 89–96
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13

Data processing in full-scale in-situ stress testing by overcoring

Information about authors

N. A. Belyakov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

K. V. Morozov², Head of Geomechanics Laboratory, Candidate of Engineering Sciences

I. A. Emelyanov¹, Post-Graduate Student, emelyanov_ia@pers.spmi.ru

¹Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²Research Center for Geomechanics and Mining Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Reliability of a geomechanical forecast is a major objective when designing and operating an underground structure.

Assessment of a forecast reliability can use one of two methods. The first method is geomechanical modeling using a selected model capable of correct description of the behavior and properties of real-life mining subjects. The second method is the in-situ stress measurement.

The authors present a processing procedure for the overcoring data, including the multi-variant numerical modeling and analytical estimation. The key target of the multi-variant numerical modeling is 3D determination of strain-and-displacement patterns in walls of a test well using an elastic model of rock mass. The proposed procedure works within the framework of elasticity theory since the basis of overcoring is the elastic recovery of an element after drilling, i.e. separation from the main rock mass. The stresses and strains correlate linearly by the Hooke law. The lab-scale test data on the strength and deformation properties of cores from the test well are analyzed.

Using the found patterns and measured displacements of walls of a rat hole at the stage of the full-scale tests, all linear and angular strains are determined and presented as a matrix (strain tensor). The normal and shear stresses are also determined and presented as tensors. The case-study of processing of the full-scale test data (measured displacements of rat hole walls) in apatite–nepheline ore host rock is described.

Keywords: in-situ stress, geomechanical forecast, numerical modeling, analytical estimation, displacements, overcoring.

References

- Protosenya A. G., Iovlev G. A. Prediction of spatial stress–strain behavior of physically nonlinear soil mass in tunnel face area. *GIAB*. 2020. No. 5. pp. 128–139.
- Protosenya A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 100–113.
- Karasev M. A., Sotnikov R. O. Prediction of the stress state of the shotcreting support under repeated seismic load. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 626–638.
- Małkowski P., Niedbalski Z. A comprehensive geomechanical method for the assessment of rockburst hazards in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 30, Iss. 3. pp. 345–355.
- Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zemtsovskiy A. V. The variants of advanced unloading zone creation on the deep levels of the Kukisvumchorr deposit. *GIAB*. 2016. No. 4. pp. 231–245.
- Karasev M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress state of the lining of underground structures of quasi-rectangular and arched forms. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 807–821.
- Protosenya A. G., Vilner M. A. Forecast of stress–strain state of fiber-reinforced concrete support in discontinuous rock masses. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021. No. 5(147). pp. 5–14.
- Aynbinder I. I., Ovcharenko O. V. Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines. *GIAB*. 2020. No. 11. pp. 57–69.
- Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite–rock salt transition zone. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 1. pp. 151–162.
- Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 2. pp. 137–147.
- Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *GIAB*. 2023. No. 4. pp. 48–66.
- Trushko V. L., Protosenya A. G., Verbilo P. E. Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite–nepheline ores. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13, No. 8. pp. 2864–2872.
- Karasev M. A., Buslova M. A., Vilner M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress–strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 628–637.

14. Eremenko V. A. Stress state modeling of coaxial three-level open stoping in Map3D. *GIAB*. 2018. No. 11. pp. 5–17.
15. Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 60–79.
16. Fairhurst C. Stress estimation in rock: A brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. Vol. 40, Iss. 7-8. pp. 957–973.
17. Petr W., Lubomir S., Jan N., Petr K., Tomas K. Determination of stress state in rock mass using strain gauge probes CCB0. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 149. pp. 544–552.
18. Jingshou Liu, Wenlong Ding, Haimeng Yang, Ruyue Wang, Shuai Yin et al. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China. *Tectonophysics*. 2017. Vol. 712-713. pp. 663–683.
19. Figueiredo B., Cornet F.H., Lamas L., Muralha J. Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 72. pp. 37–48.
20. Ali Saeidi, Shahriyar Heidarzadeh, Lalancette S., Rouleau A. The effects of in situ stress uncertainties on the assessment of open stope stability: Case study at the Niobec Mine, Quebec (Canada). *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2021. Vol. 25. 100194. DOI: 10.1016/j.gete.2020.100194
21. Baker W. E., Dove R. C. Construction and Evaluation of a Three-Dimensional Strain Rosette. *Experimental Mechanics*. 1963. Vol. 3, Iss. 9. pp. 201–206.
22. Baotang Shen, Yi Duan, Xun Luo, van de Werken M., Bongani Dlamini et al. Monitoring and modeling stress state near major geological structures in an underground coal mine for coal burst assessment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 129. 104294. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104294
23. Scelsi G., De Bellis M.L., Pandolfi A., Musso G., Della Vecchia G. A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 176. pp. 994–1007.
24. Roshan H., Danqi Li, Ismet Canbulat, Regenauer-Lieb K. Borehole deformation based in situ stress estimation using televiewer data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.12.016
25. Pudov E., Kuzin E., Efremov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 939. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012063
26. Bazhenova E. A. Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *GIAB*. 2022. No. 5. pp. 67–83.
27. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *GIAB*. 2020. No. 3-1. pp. 216–223.
28. Novikov E. A., Shkuratnik V. I., Zaytsev M. G. Manifestations of Acoustic Emission in Frozen Soils with Simultaneous Influence of Variable Mechanical and Thermal Effects on Them. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 238. pp. 383–391.
29. Mafakheri Bashmogh N., Lin W., Murata S., Foad Yousefi, Radwan A. E. Magnitudes and orientations of present-day in-situ stresses in the Kurdistan region of Iraq: Insights into combined strike-slip and reverse faulting stress regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2022. Vol. 239. 105398. DOI: 10.1016/j.jseas.2022.105398
30. Morozov K. V., Bakhtin E. V., Demekhin D. N. et al. Rock mass stress-strain assessment device. Patent RF, No. 2763565. Applied: 07.07.2021. Published: 30.12.2021. Bulletin No. 1.
31. GOST 21153.2–84. Rocks. Methods for determination of axial compression strength. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 2001. 8 p.
32. GOST 28985–91. Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 2004. 11 p.
33. Brown E. T. Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods. Oxford: Pergamon Press, 1981. 211 p.
34. Jiayi Shen, Murat Karakus, Chaoshui Xu. A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012. Vol. 32. pp. 245–250.
35. Timoshenko S. P., Goodier J. N. Theory of Elasticity. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 608 p.

Для обеспечения конкурентного преимущества в условиях постоянного изменения экономических факторов ПАО «ГМК «Норильский никель» постоянно совершенствует организационные и производственные процессы, добиваясь непрерывного повышения эффективности и снижения издержек производства.

Перспективные направления развития горных работ по всем добывающим активам компании связаны с увеличением глубин разработки и усложнением горногеологических условий отработки руд. При этом, помимо повышения эффективности добычи, важнейшим требованием компании является обеспечение безопасности по отношению как к сотрудникам, так и к окружающей природе.

Нахождение тонкого баланса между производительностью и безопасностью работ возможно только при условии применения обоснованных технических решений, которые, в свою очередь, должны основываться на результатах специальных научных исследований и расчетах.

Для получения качественных услуг по научному обеспечению компания взаимодействует с разными научно-исследовательскими и проектными организациями. Особое место в этом списке занимает Научный центр геомеханики и проблем горного производства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». Являясь продолжателем научной школы знаменитого в советские времена ВНИИМИ, Научный центр на протяжении всей своей 15-летней жизни осуществлял тесное сотрудничество с ПАО «ГМК «Норильский никель». Сотрудники Научного центра участвовали в решении многих сложнейших актуальных задач, возникающих перед горнодобывающими подразделениями компании. Спектр рассмотренных вопросов включает разработку разделов проектной и нормативно-технической документации, обоснование крепления и поддержания горных выработок, в том числе в сложных горно-геологических и геомеханических условиях, вопросы предотвращения горных ударов, сдвиги и охраны подрабатываемых объектов, совершенствования параметров систем разработки, а также многие другие. Отличительной особенностью разрабатываемых рекомендаций является сочетание высокого научного уровня с прикладной практичностью и реалистичностью внедрения в действующее производство. Такой эффект достигается, в том числе, благодаря сбалансированному кадровому составу Научного центра – наряду с научными сотрудниками, получившими качественное академическое образование в стенах Горного университета, задействованы также специалисты, имеющие богатый практический опыт на горнодобывающих предприятиях, в том числе и на рудниках Норильского никеля.

Надеемся на развитие дальнейшего сотрудничества Научного центра с ПАО «ГМК «Норильский никель», результатом которого станет взаимное повышение компетенций и достижение более высоких профессиональных высот.

А. В. Окунович,
директор Департамента инжиниринга
проектно-минерально-сырьевого комплекса