



**ОЦЕНКА ОБЛАСТЕЙ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ
В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА**

М. А. Журавков, С. С. Хвесеня, С. Н. Лопатин

*Белорусский государственный университет, E-mail: lopatinsn@tut.by,
просп. Независимости 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь*

Представлены результаты математического моделирования деформационных процессов в массиве горных пород в окрестности контура выработки, происходящие до возведения основной бетонной крепи для случая вертикальной проходки (ствола) в многослойном породном массиве. Предложен алгоритм решения геомеханических модельных задач такого типа. Проведена оценка областей нарушения сплошности и разрушения в окрестности выработки в соответствии с различными предельными критериями. Модельные исследования выполнены с использованием расчетных схем на базе метода конечных элементов. Показано, что необходима проверка массива горных пород на наличие опасных зон более чем одним критерием в связи с тем, что нарушение сплошности может быть вызвано различными факторами.

Математическое моделирование, многослойный горный массив, предельные критерии, нарушение сплошности, численное моделирование

**EVALUATION OF ROCK MASS DISCONTINUITY AND FAILURE ZONES
AROUND UNDERGROUND EXCAVATIONS**

M. A. Zhuravkov, S. S. Hvesenya, and S. N. Lopatin

*Belorussian State University, E-mail: lopatinsn@tut.by,
pr. Nezavisimosti 4, Minsk 220030, Republic of Belarus*

This paper presents results of the mathematical modeling of deformation processes in a multilayered rock massif, which take place in the neighborhood of a vertical excavation (shaft) before it is provided with concrete-lining. An algorithm for solving geomechanical modeling problems of such type is proposed. The areas of discontinuity and destruction of the rock surrounding the shaft are evaluated according to different limit criteria. The modeling was performed using the computational schemes based on the finite element method. It is shown that the rock mass should be checked for the presence of hazardous zones justified by more than one criterion, because discontinuity of rock mass can be caused by a wide range of factors.

Mathematical modeling, multilayered rock massif, limit criteria, discontinuity areas, numerical modeling

Расчеты на устойчивость и прочность вмещающих массивов горных пород в окрестности подземных выработок существенным образом определяются выбранными предельными критериями. В свою очередь, принятие того либо иного критерия в качестве оценки предельного (критического) состояния массивов горных пород должно быть обоснованным и базироваться на закономерностях и особенностях рассматриваемого физического процесса. В связи с этим актуальной представляется задача сравнения областей нарушения сплошности массивов горных пород в окрестности подземных выработок, построенных в зависимости от выбора различных предельных критериев, и их геомеханическая интерпретация.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на примере моделирования деформационных процессов в массиве горных пород в окрестности контура вертикальной выработки, происходящие до возведения основной бетонной крепи. Модельные исследования состояли в рассмотрении последовательности решения нескольких задач с модификацией механических характеристик вмещающего массива, обусловленной появлением зон нарушения сплошности (области техногенной трещиноватости, подвижки по системам естественных трещин и слоистости и т. п.) в отдельных зонах в окрестности контура выработки. С учетом данного факта, алгоритм решения модельной геомеханической задачи выглядит следующим образом.

Решается задача с исходными заданными механическими характеристиками вмещающего массива. В соответствии с выбранным предельным критерием выделяются области нарушения сплошности и разрушения приконтурного массива горных пород. В выделенных областях изменяются механические характеристики массива и определяется его новое напряженно-деформированное состояние (НДС). Далее повторяется процедура выявления мест появления областей нарушения сплошности приконтурного массива. В данных областях оцениваются накапливаемые перемещения на контуре выработки и сравниваются с предельными. Итерационная процедура повторяется до “стабилизации” НДС или до момента, когда зона нарушения сплошности или разрушения будет охватывать весь контур обнажения.

Модельные исследования выполнялись для случая проходки вертикальной выработки (ствола) в многослойном породном массиве. В такой ситуации при ведении горных работ и образовании контура обнажения, помимо появления зон разрушения пород, нарушение сплошности во вмещающем массиве может происходить вследствие смещения (подвижек) по контактными поверхностям слоев внутрь выработанного пространства. Следует отметить, что при этом зон нарушения сплошности в соответствии, например, с предельными критериями, учитывающими обобщенное сжатие, может не наблюдаться (рис. 2–4).

В зонах образования значительных горизонтальных подвижек в качестве граничного условия использовалось уравнение Кулона – Мора, которое, как известно, является приемлемым для определения появления зон необратимых деформаций, но может также эффективно применяться и для областей упругих деформаций, если контактные подвижки в таких областях достаточно велики.

Стандартное представление уравнения Кулона – Мора имеет вид:

$$\tau_n = \sigma_n \tan \varphi + \tau_0, \quad (1)$$

где τ_n — касательное напряжение; σ_n — нормальное напряжение; φ — угол внутреннего трения (соответственно $\tan \varphi$ — коэффициент внутреннего трения); τ_0 — сцепление.

Будем использовать запись уравнения (1) в главных напряжениях:

$$\sigma_1 - (2\lambda + 1)\sigma_3 = \sigma_{\text{press}}, \quad (2)$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно максимальное и минимальное главные нормальные напряжения,

$\lambda = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, σ_{press} — предел прочности пород при одноосном сжатии.

Подчеркнем, что критерий (1) учитывает разрушение породных образований как в результате сдвига, так и в результате отрыва, что в полной мере соответствует рассматриваемому нами процессу. Разрушение путем сдвига происходит тогда, когда касательное напряжение, действующее в плоскости сдвига и зависящее от нормального к этой плоскости напряжения, достигнет величины, определяющей прочность материала. Разрушение путем отрыва будет иметь место в том случае, когда наименьшее нормальное напряжение достигнет величины предела прочности породы при одноосном сжатии.

С учетом запредельного деформированного состояния критерий прочности горных пород Кулона – Мора (2) модифицируется следующим образом [1]:

$$\sigma_1^* = (2\lambda + 1)\sigma_3 + \sigma_{\text{press}} - E^*e_1', \quad (3)$$

Условие (3), в соответствии с [1], будем называть деформационным критерием прочности. В (3) деформации e_1' соответствуют переходу деформируемой среды в состояние руинного разрушения, когда сопротивляемость материала снижается до минимального значения (остаточной прочности); E^* — модуль деформации нисходящего участка полной диаграммы.

Помимо данных критериев, для оценки прочности массивов горных пород в окрестности вертикальной выработки использовался энергетический критерий, основанный на выражении для интенсивности напряжений. Согласно данному критерию условие прочности записывается следующим образом [1, 2]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma], \quad (4)$$

где $[\sigma]$ — предел прочности пород при одноосном сжатии.

Главное достоинство данного критерия заключается в том, что эквивалентное напряжение определяется значениями всех трех главных напряжений.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данном разделе приведены результаты модельных исследований, выполненных с помощью расчетных схем на базе метода конечных элементов. Рассматривался процесс проходки вертикальной выработки в многослойном массиве горных пород с продуктивными слоями каменной соли. Оценка прочности массива горных пород с вертикальной выработкой выполнялась на основе критерия Кулона – Мора (2), деформационного критерия (3) и критерия максимально допустимой интенсивности напряжений (4).

Подчеркнем, что для изучения появления зон нарушения сплошности в многослойном массиве важно, что условие Кулона – Мора является приемлемым не только для зон необратимых деформаций, но и для областей с упругими деформациями, если контактные подвижки в таких областях достаточно велики. В качестве примера рассмотрим результаты выполненных численных расчетов для интервала породной толщи с глиной аргиллитоподобной. Учитывался как процесс формирования ледопородного ограждения в окрестности контура ствола, так и случай незамороженных пород на данном интервале. Величины физико-механических показателей пород взяты из работ [3 – 5].

Критерий Кулона – Мора (2) с учетом конкретных значений физико-механических показателей приобретает следующий вид для незамороженных и замороженных пород соответственно (в МПа):

$$\sigma_1 - 1.3\sigma_3 \leq 2.25 \quad \text{и} \quad \sigma_1 - 2.3\sigma_3 \leq 5. \quad (5)$$

Для записи в явном виде критерия (3) выполнена интерпретация полной диаграммы деформирования горных пород для исследуемого участка [3 – 5] (рис. 1).

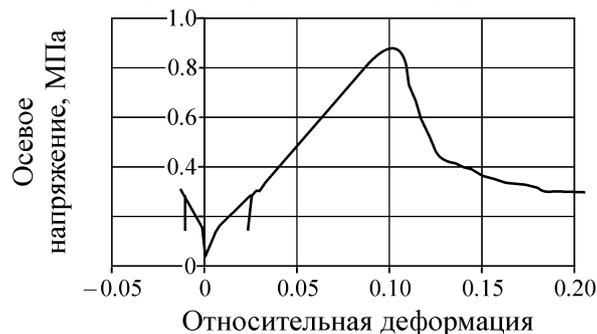


Рис. 1. Полная диаграмма деформирования глины аргиллитоподобной

На основании обработки данных экспериментальных исследований принимаем, что модуль деформации нисходящего участка полной диаграммы равен $E^* = 1.5$ МПа, а максимальные допустимые остаточные деформации — $e'_1 = 0.03$. Следовательно, для исследуемого интервала породной толщи деформационный критерий прочности для вариантов без замораживания и с замораживанием массива горных пород соответственно записывается так (МПа):

$$\sigma_1 - 1.3\sigma_3 + 0.045 \leq 2.25 \quad \text{и} \quad \sigma_1 - 2.3\sigma_3 + 0.045 \leq 5. \quad (6)$$

Значения предельной величины $[\sigma]$ при использовании критерия (4) для рассматриваемого интервала пород выбирались равными 2.25 и 5 МПа для немерзлых и мерзлых пород соответственно. На рис. 2 представлены примеры результатов оценки НДС массива горных пород при выполнении проходческих работ на глубинах 150–167 м.

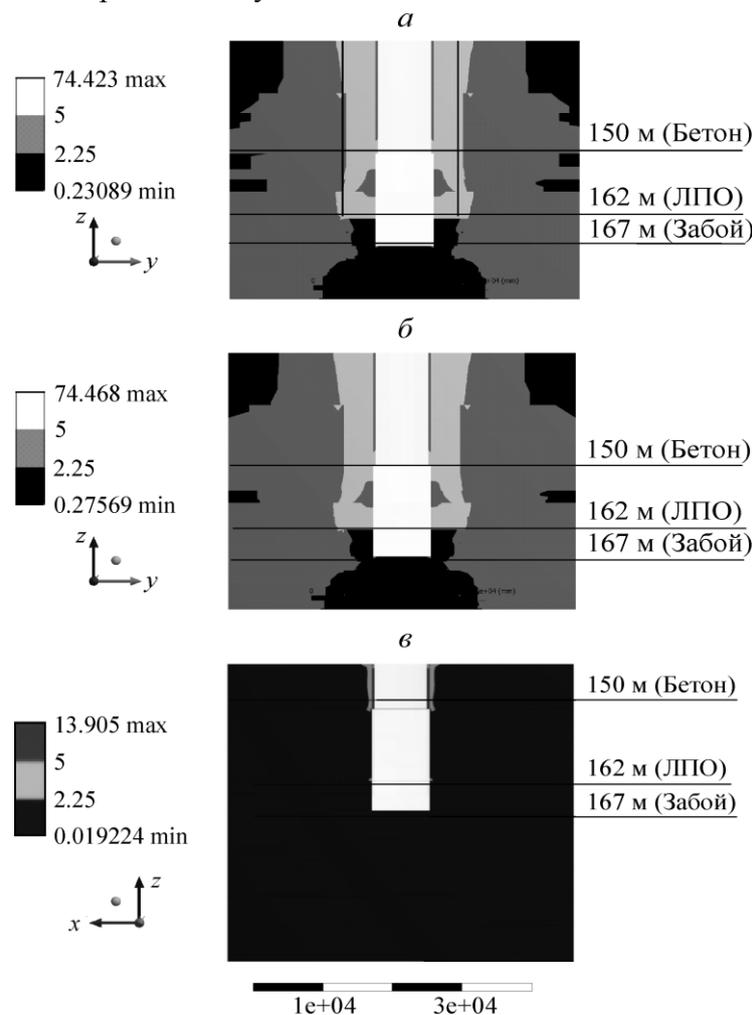


Рис. 2. Оценка прочности вмещающего массива пород: *a* — по критерию (2); *б* — по критерию (3); *в* — по критерию (4)

ВЫВОДЫ

Согласно результатам численного моделирования можно констатировать, что зона нарушения сплошности, в соответствии с критерием Кулона–Мора (2), в области ледопородного ограждения формируется только в его нижней части (в пределах 150–162 м). В то же время область незамороженной части породного массива в районе забоя не находится в состоянии нарушения критерия Кулона–Мора. Напомним, в модельной задаче в рассматриваемом случае нарушение критерия Кулона–Мора означает проявление контактных подвижек пород достаточно больших величин.

Повторные расчеты с применением деформационного критерия прочности (3) и учетом образования областей руинного разрушения показывают, что размеры областей значительных контактных подвижек не увеличиваются существенным образом. Это означает, что процесс смещения породной толщи внутрь контура обнажения не имеет лавинообразного характера. Следовательно, в нижней незакрепленной части ледопородного ограждения и в области забоя предотвращения вывалов пород в выработанное пространство можно не допустить, используя меры охраны (например, установка сетки с анкерами).

Следует отметить, что оценка НДС по энергетическому критерию (4) не показала наличия опасных зон в массиве, однако на практике разрушение породной толщи все же имело место, что подтвердило использование критериев Кулона – Мора и деформационного критерия. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при оценке НДС следует проверять массив горных пород на наличие опасных зон более чем одним критерием в связи с тем, что нарушение сплошности может быть вызвано различными факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Baklashov I. V.** Deformation and destruction of rock massifs, Moscow, Nedra, 1988 (in Russian) [Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. — М.: Недра, 1988. — 271 с.]
2. **Zhuravov M. A. and Zubovich V. S.** Stability and displacement of rock massifs, Moscow, RUDN, 2009, 432 pp. (in Russian) [Журавков М. А., Зубович В. С. Устойчивость и сдвигание массивов горных пород. — М.: РУДН, 2009. — 432 с.]
3. **Konstantinova S. A. and Aptukov V. N.** Some problems of mechanics of deformation and destruction of salt rocks, OJSC “Galurgia”, Novosibirsk, Nauka, 2013, 191 pp. (in Russian) [Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород / ОАО “Галургия”. — Новосибирск: Наука, 2013. — 191 с.]
4. **Ponomarev A. B. and Sychkina S. A.** Experimental field studies of the deformability of argillite-like clays and sandstones, Vestnik MGSU, 2018, no. 6, pp. 756–767 [Пономарев А. Б., Сычкина Е. Н. Экспериментальные полевые исследования деформируемости аргиллитоподобных глин и песчаников // Вестник МГСУ. — 2018. — № 6. — С. 756–767.]
5. **Ladynin A. V.** Physical properties of rocks, Novosibirsk, Novosibirsk State University, 2010, 101 pp. (in Russian) [Ладынин А. В. Физические свойства горных пород: учеб. пособие. — Новосибирск: НГУ, 2010. — 101 с.]