



МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 51-74

М.А. ЖУРАВКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф.
заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики¹
E-mail: zhuravkov@bsu.by

С.С. ХВЕСЕНЯ
заведующий НИЛ прикладной механики¹

С.Н. ЛОПАТИН, магистр физ.-мат. наук
инженер-программист НИЛ прикладной механики¹
E-mail: lopatinsn@tut.by

М.А. НИКОЛАЙЧИК
стажер младшего научного сотрудника НИЛ прикладной механики¹

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступил в редакцию 19.09.2019.

УСТОЙЧИВОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В работе рассматриваются вопросы, относящиеся к решению важной проблемы, связанной с оценкой устойчивости и прочности различных элементов подземных сооружений. Речь идет об общей научно-методологической базе и подходах к определению понятий «устойчивость и прочность элементов подземных сооружений», выборе и построении критериев «устойчивости и прочности элементов подземных сооружений». Предложенные подходы и технологии демонстрируются на решении актуальных прикладных задач геомеханики. Первая из рассмотренных задач — задача о прочности многослойного массива горных пород при ведении горнопроходческих работ. Прочность массива оценивается на основе различных критериев, и выдаются рекомендации о выборе прочностных критериев для данного типа задач. Вторая задача — задача оценки долговременной устойчивости ответственных подземных сооружений больших площадей при их длительной эксплуатации. Долговременная прочность подземных камер нестандартной геометрии рассматривается с учетом реологических эффектов, происходящих в массиве горных пород.

Ключевые слова: подземные сооружения, критерии прочности, реологические процессы, конечно-элементное моделирование

Введение. Оценка прочности и устойчивости различных подземных сооружений представляет собой одну из наиболее актуальных и в то же время сложных задач современной геомеханики. В условиях Республики Беларусь данный тип задач особенно важен ввиду интенсивного развития горнодобывающей промышленности и, как следствие, большого количества подземных сооружений.

Основную сложность при проведении прочностных расчетов подземных сооружений представляет выбор предельных критериев для оценки

напряженно-деформированного состояния. Несмотря на то, что теоретическая база для различных критериев прочности развита достаточно хорошо [1], зачастую в классических теориях не учитываются физические особенности материалов (таких как, например, горные породы), поскольку выстроены они на достаточно узкой экспериментальной базе. В связи с этим, в последнее время в научной литературе набирает популярность выработка специальных теорий прочности, имеющих более узкую область применения. Так, в работе [1]

проводится анализ классических теорий прочности с точки зрения применения прочностных критериев к массивам горных пород, а в работе [2] предлагается структурно-временной подход (критерий инкубационного времени) при расчете прочности горных пород.

Аналогичная проблема возникает при анализе долговечности вмещающих массивов горных пород в окрестности подземных сооружений, поскольку в данном случае напряженно-деформированное состояние существенным образом определяется выбором модели ползучести горных пород [3, 4]. В свою очередь, выбор той или иной математической модели реологического поведения массива горных пород должен быть обоснованным и базироваться на основных закономерностях и особенностях рассматриваемого физического процесса.

В связи с этим, актуальной представляется задача о выработке научно-практической базы для решения задач геомеханики с учетом специфики физических процессов, происходящих в горных породах.

Оценка прочности горного массива в окрестности вертикальной выработки (ствола). В данном разделе приведем пример решения задачи об оценке зон разрушения при выполнении проходческих работ и работ по возведению бетонной крепи ствола в слоистом горном массиве. Решение задачи будем производить при помощи численных методов на базе разностных схем метода конечных элементов.

Геометрическая модель задачи представлена на рисунке 1. В качестве граничных условий принимается удаленная жесткая заделка подошвы и гидростатическое давление на вертикальных границах рассматриваемого участка горного массива. Также учитывается влияние собственного веса горных пород. Задача решается в статической упругопластической постановке.

В качестве предельных критериев для оценки прочности околоствольного массива будем использовать следующие выражения [5]:

1. Уравнение (критерий) Кулона–Мора в главных напряжениях:

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

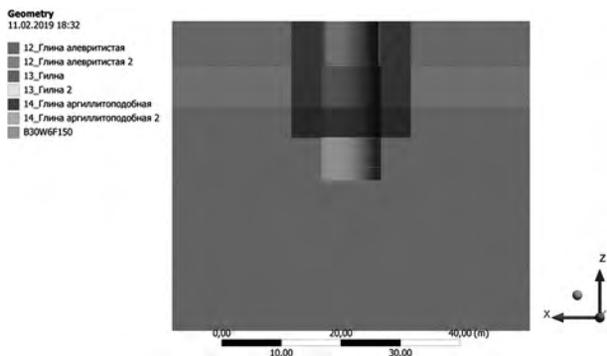


Рисунок 1 — Плоское сечение рассматриваемого массива горных пород

Figure 1 — Flat section of the considered rock massif

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

$$\lambda = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \sigma_{press} — \text{предел прочности пород при од-}$$

ноосном 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.

2. Модифицированный с учетом запредельного деформированного состояния критерий прочности Кулона–Мора [5]:

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

Условие (2) будем называть деформационным критерием прочности. В (2) 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.

3. Энергетический критерий прочности, основанный на выражении для интенсивности напряжений. Согласно данному критерию условие прочности записывается следующим образом [6]:

$$\sigma_{эки} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma], \quad (3)$$

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

Следует отметить, что выражение (3) является одним из наиболее распространенных критериев прочности. Главное достоинство данного критерия заключается в том, что эквивалентное напря-



Рисунок 2 — Оценка прочности вмещающего массива по критерию (1)

Figure 2 — Strength assessment of the enclosing rock massif according to the criterion (1)

жение определяется значениями всех трех главных напряжений.

На рисунках 2–5 представлены результаты численного моделирования проходческих работ. Следует отметить, что перед началом проходки согласно технологии выполнения работ осуществляется возведение ледопородного ограждения (заморозка массива). В данном случае заморозка осуществлялась в радиусе 5 метров от выработки (см. рисунок 1, темно-серая область). Предел прочности глины аргиллитоподобной на сжатие в рассматриваемом интервале составляет 2,25 МПа и 5 МПа в талом и замороженном состояниях соответственно [5].

На рисунках 2–4 представлены примеры результатов оценки НДС массива горных пород при выполнении проходческих работ на глубинах 150–167 м.

На представленных рисунках серым цветом выделены области возможного разрушения (нарушения сплошности), светло-серым цветом выделены зоны с коэффициентом запаса прочности менее 2, темно-серым цветом выделены зоны с коэффициентом запаса прочности 2 и более.

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.

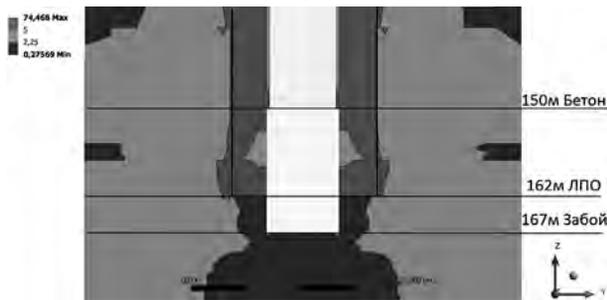


Рисунок 3 — Оценка прочности вмещающего массива по критерию (2)

Figure 3 — Strength assessment of the enclosing rock mass according to the criterion (2)



Рисунок 4 — Оценка прочности вмещающего массива по критерию (3)

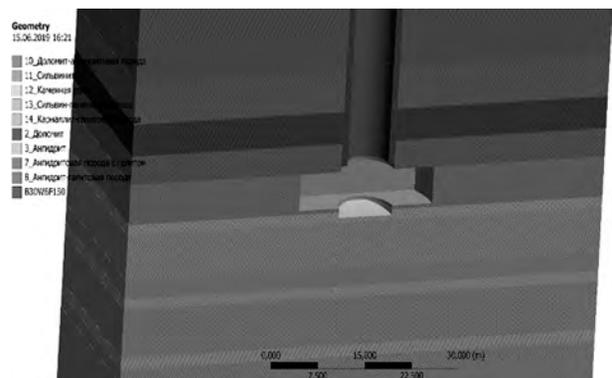
Figure 4 — Strength assessment of the enclosing mass to the criterion (3)

Оценка долговечности подземной камеры большого поперечного сечения. В данном разделе приведем другой пример решения практической задачи — задачи об оценке долговечности подземной камеры.

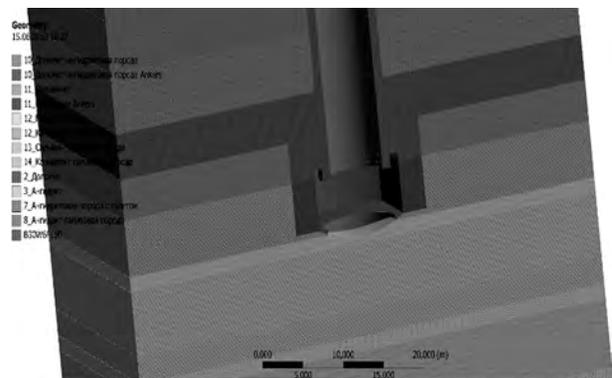
Геометрическая модель задачи приведена на рисунке 5. Как и в предыдущем случае решение задачи будем производить при помощи численных методов на базе разностных схем метода конечных элементов.

Для обеспечения сохранения камеры опорных балок в эксплуатационно-пригодном состоянии используются следующие меры охраны и крепления: на стенках и кровле (в интервале залегания доломит-ангидритовой породы и сильвинита) применяется железная сетка с анкерами, длина которых составляет 3 м; на почве ниши создается бетонная крепь совместно с железобетонным основанием (в интервале залегания каменной соли). В связи с этим, согласно результатам выполненных ранее исследований [6], можно принять допущение о том, что в зоне действия анкеров модуль Юнга и мгновенный предел прочности на сжатие горных пород увеличивается в 1,2 раза.

В качестве начальных граничных условий принято, что на массив и конструкции действует сила тяжести, на вертикальных удаленных границах модели принято условие отсутствия нормальных перемещений, на нижней удаленной границе мо-



a



b

Рисунок 5 — Геометрическая модель подземной камеры: a — продольное сечение; b — поперечное сечение
Figure 5 — Geometric model of underground chamber: a — longitudinal section; b — transverse section

дели принято условие полного закрепления, на верхней границе модели задано давление веса вышележащих пород.

Основную сложность при оценке долговечности подземных сооружений представляет собой выбор адекватной математической модели ползучести горных пород.

Наиболее часто в качестве функции ползучести принимается зависимость скорости деформаций ползучести от интенсивности напряжений σ_{eq} в виде

$$\dot{\epsilon} = c_1 \sigma_{eq}^{c_2} t^{c_3}. \quad (4)$$

Проинтегрировав данное выражение по времени, можно получить зависимость деформаций ползучести от интенсивности напряжений σ_{eq} в следующем виде:

$$\epsilon = \frac{c_1 \sigma_{eq}^{c_2} t^{c_3}}{c_3} + \epsilon_0. \quad (5)$$

И все же следует отметить, что для более корректного описания характеристик ползучести во времени для нестандартных инженерных задач требуется большее число компонент. Примером такой функции ползучести может служить следующая зависимость деформаций ползучести от интенсивности напряжений σ_{eq} :

$$\epsilon = C_1 \sigma_{eq}^{c_2} t^{c_3} + C_4 \sigma_{eq}^{c_5} t + \epsilon_0. \quad (6)$$

Особенность зависимости вида (6) состоит в том, что она учитывает как деформации первичной ползучести (первое слагаемое), так и вторичной (второе слагаемое).

На рисунках 6–7 приведены результаты моделирования ползучести массива горных пород с применением различных функций ползучести.

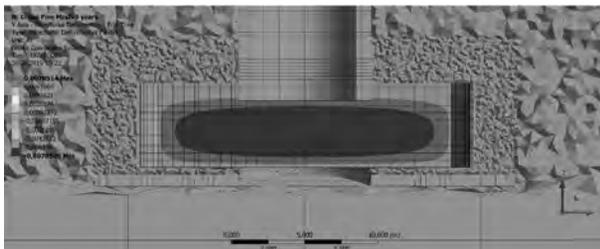


Рисунок 6 — Нормальные перемещения в сечении А–А по истечении 5 лет, функция ползучести (4)
Figure 6 — Normal displacements in cross-section A–A after 5 years, creep function (4)

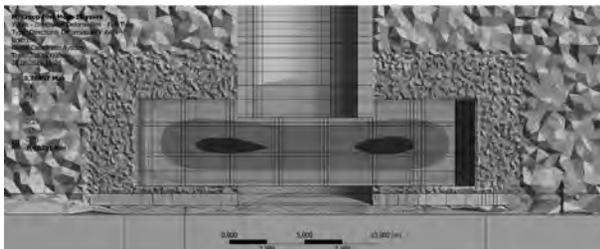


Рисунок 7 — Нормальные перемещения в сечении А–А по истечении 10 лет, функция ползучести (6)
Figure 7 — Normal displacements in cross-section A–A after 10 years, creep function (6)

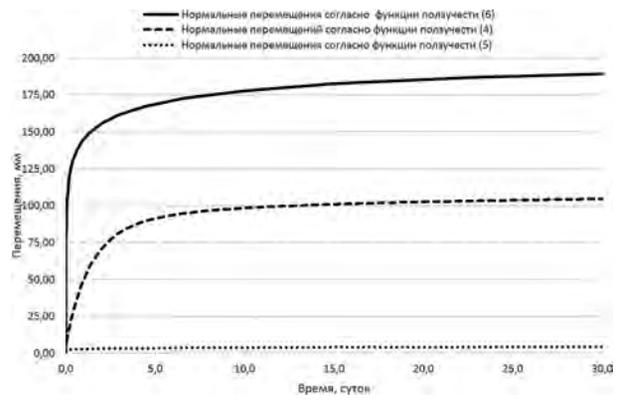


Рисунок 8 — Сравнение зависимостей максимальных нормальных перемещений от времени на кровле камеры в соответствии с различными моделями ползучести
Figure 8 — Comparison of the maximum normal displacements dependences on time on the roof of the chamber according to various creep models

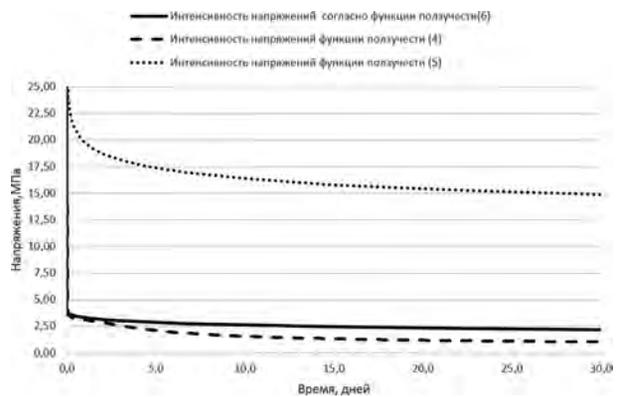


Рисунок 9 — Сравнение зависимостей интенсивностей напряжений от времени на длинной стенке ниши в соответствии с различными моделями ползучести
Figure 9 — Comparison of the equivalent stress dependences on time on the long wall of the chamber according to various creep models

На рисунках 8, 9 представлены результаты сравнения перемещений и интенсивностей напряжений, полученных на основе различных математических моделей ползучести (4)–(6). Как видно из представленных рисунков, при решении реальных практических задач разные математические модели дают абсолютно разные количественные результаты.

Заключение. В рамках изложенных модельных исследований выполнены расчеты напряженно-деформируемых состояний массивов горных пород и подземных сооружений при различных условиях.

Исходя из результатов моделирования понятно, что использование различных математических моделей ползучести и различных предельных критериев приводит к абсолютно разным результатам, даже несмотря на то, что построены они на одних и тех же данных экспериментальных исследований.

Таким образом можно сделать вывод о том, что следует выработать специальные математические модели и предельные критерии, которые будут учитывать специфику физических процессов в определенных областях. Применение стандарт-

ных математических моделей ползучести и предельных критериев не всегда оправдано, т. к. они могут не учитывать все необходимые особенности.

Список литературы

1. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии / Л.М. Васильев [и др.]. — Днепро: ИМА-пресс, 2018. — 176 с.
2. Норель, Б.К. Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород / Б.К. Норель, Ю.В. Петров, Н.С. Селютин. — СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2018. — 132 с.
3. Ержанов, Ж.С. Ползучесть соляных пород / Ж.С. Ержанов, Э.И. Бергман. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 112 с.
4. Габдрахимов, И.Х. Ползучесть и феноменологическая теория длительной прочности горных пород / И.Х. Габдрахимов, М.Н. Дедюкин, А.А. Поздеев // Прикладные задачи механики горных пород: материалы пятой Всесоюз. конф. по механике горных пород. — М., 1977. — С. 71–75.
5. Журавков, М.А. Оценка областей нарушения сплошности и разрушения в окрестности выработки в соответствии с различными предельными критериями / М.А. Журавков, С.С. Хвесеня, С.Н. Лопатин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019.
6. Журавков, М.А. Устойчивость и сдвигание массивов горных пород / М.А. Журавков, В.С. Зубович. — М.: РУДН, 2009. — 432 с.

ZHURAVKOV Mikhail A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: zhuravkov@bsu.by

HVESENYA Sergey S.

Head of the Research Laboratory of Applied Mechanics¹

LAPATSIN Sergey N.

Programming Engineer of the Research Laboratory of Applied Mechanics¹

E-mail: lopatinsn@tut.by

NIKOLAITCHIK Mikhail A.

Assistant of the Junior Researcher of the Research Laboratory of Applied Mechanics¹

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 19 September 2019.

STABILITY AND STRENGTH ASSESSMENT OF THE UNDERGROUND STRUCTURE ELEMENTS

The paper considers an important problem of assessing the stability and strength of various elements of underground structures. The work complements the general scientific and methodological base of such concepts as “stability and strength of elements of underground structures” and forms the principles of selection the criteria of “stability and strength of elements of underground structures”. The proposed approaches and technologies are demonstrated on the examples of solving applied problems of geomechanics. The first of the problems considered is the problem of the strength of a multilayer rock massif during mining operations. The strength of the massif is evaluated based on various criteria. Some recommendations on the choice of strength criteria for this type of problem are given. The second problem is the problem of assessing the long-term stability of the underground structures of a large cross-section. The long-term stability of an underground structure of non-standard geometry is considered taking into account the rheological effects occurring in the rock massif.

Keywords: underground structures, strength criteria, rheological processes, finite element modelling

References

1. Vasilev L.M., Vasilev D.L., Malich N.G., Angelovskiy A.A. *Mekhanika obrazovaniya form razrusheniya obraztsov gornykh porod pri ikh szhatii* [Mechanics of formation and destruction of rock samples under compression]. Dnipro, IMA-press Publ., 2018. 176 p.
2. Norel B.K., Petrov Yu.V., Selyutina N.S. *Energeticheskie i vremennye kharakteristiki predelnogo sostoyaniya gornykh porod* [Energy and time characteristics of the limit state of rocks]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy universitet Publ., 2018. 132 p.
3. Erzhanov Zh.S., Bergman E.I. *Polzuchest solyanykh porod* [Creep of saliferous rocks]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1977. 112 p.
4. Gabdrakhimov I.Kh., Dedyukin M.N., Pozdееv A.A. *Polzuchest i fenomenologicheskaya teoriya dlitelnoy prochnosti gornykh porod* [Creep and phenomenological theory of long-term rock strength]. *Prikladnye zadachi mekhaniki gornykh porod* [Applied problems of rock mechanics], 1977, pp. 71–75.
5. Zhuravkov M.A., Hvesenya S.S., Lapatsin S.N. *Otsenka oblastey narusheniya sploshnosti i razrusheniya v okresnosti vyrabotki v sootvetstvi s razlichnymi predelnymi kriteriyami* [Assessment of areas of discontinuity and fracture in the vicinity of the mine in accordance with various limit criteria]. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and applied problems of mining], 2019.
6. Zhuravkov M.A., Zubovich V.S. *Ustoychivost i sdvizhenie massivov gornykh porod* [Stability and displacement of rock masses]. Moscow, Rossiyskiy universitet druzhby narodov Publ., 2009. 432 p.