

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.60.42.003

УДК 622.235.5; 622.284.74

© В.Ю. Масаев, Ю.А. Масаев, 2021

В.Ю. МАСАЕВ

канд. техн. наук, доцент
КГСХА, КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: masaev-62@mail.ru



Ю.А. МАСАЕВ

канд. техн. наук, профессор,
профессор КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: masaev-62@mail.ru



АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом — традиционный способ добычи полезных ископаемых, требующий сооружения целого комплекса горных выработок различного назначения. Породный массив постоянно находится в напряженном состоянии, зависящем от условий формирования, залегания, наличия напряжённо-деформированных зон, формируемого горного давления и других факторов. При проведении комплекса горных выработок нарушается естественное состояние массива горных пород, возникают нежелательные процессы в породном массиве в виде обрушений пород в выработку, больших смещений её контура и других явлений, нарушающих устойчивость породных обнажений.

Потеря устойчивости породных обнажений приводит к аварийным ситуациям с тяжёлыми последствиями, поэтому постоянно ведутся исследования и разработки мероприятий по исключению таких последствий.

В статье приведен анализ исследований различных авторов по разработке критериев устойчивости породных обнажений, отмечены недостатки и некоторые недоработки, а также необходимость исключения отмеченных недостатков.

Ключевые слова: УСТОЙЧИВОСТЬ ПОРОДНЫХ ОБНАЖЕНИЙ, ОБРУШЕНИЕ ПОРОД, КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ, СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ, ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ.

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом начинается с комплекса подготовительных работ, включающих проведение горных выработок различного назначения. На этапе добычи полезных ископаемых изменяются условия эксплуатации горных выработок. Интенсификация горных работ вызывает необходимость

увеличения площади поперечного сечения выработок, постоянное увеличение глубины горных работ приводит к росту горного давления, что в свою очередь приводит к потере устойчивости породных обнажений.

«Устойчивым считается такое состояние обнаженного незакрепленного массива горных пород, при котором в течение необ-

ходимого по условиям производства времени не происходит обрушения или сползания породного массива, а смещение обнаженной поверхности или ее части не выходит за допустимые пределы» [1]. Применительно к незакрепленным горным выработкам понятие устойчивости породных обнажений трактуется как «способность обнажаемых пород сохранять форму и размеры выработки, заданные по условиям нормальной эксплуатации» [2].

На протяжении многих лет при добыче полезных ископаемых велись исследования по изучению причин потери устойчивости породных обнажений и разработке мероприятий, предотвращающих возникновения аварийных ситуаций.

Снижение устойчивости породных обнажений может происходить по различным причинам, но в общем виде принято выделять три формы потери устойчивости пород:

- вывалообразование под действием собственного веса обрушающихся горных пород;
- разрушение пород в зонах концентрации напряжений (в том числе разрушения по поверхностям ослаблений);
- чрезмерное смещение обнаженной поверхности без видимого разрушения пород вследствие их пластических деформаций [2].

Прогнозирование устойчивости незакрепленной горной выработки «при детерминистической постановке задачи сводится к проверке выполнения условия:

$$R_g - R_{сж} \leq 0, \quad (1)$$

где R_g — главное максимальное напряжение, действующее на контуре незакрепленной выработки; $R_{сж}$ — предел прочности породы на одноосное сжатие.

Различные варианты данного условия связаны либо с уточнением величин R_g и $R_{сж}$, для чего используется целая система коэффициентов, учитывающих различные факторы, либо с различными способами сравнения напряжений и прочностных характеристик пород.

При выполнении условия породное обнажение классифицируется как устойчивое. Не выполнение данного условия связано с обра-

зованием в окрестности выработки области предельного равновесия и породное обнажение считается неустойчивым. На базе этого условия разработан целый ряд численных критериев, позволяющих классифицировать породные обнажения по степени устойчивости» [3].

Одной из первых работ, посвященных исследованию устойчивости породных обнажений, является работа П.М. Цимбаревича [1], в которой рекомендован метод определения устойчивости обнажений в подземных горных выработках:

$$H < \frac{1-\mu}{K} * \frac{R_{сж}}{\gamma}, \quad (2)$$

где H — глубина выработки; μ — коэффициент Пуассона; $R_{сж}$ — предел прочности на сжатие; γ — объемный вес пород; K — коэффициент концентрации главных нормальных напряжений.

На основе лабораторных и шахтных исследований изучалась механика процессов, происходящих в горных породах при производстве работ в очистных и подготовительных выработках, и составлялся прогноз деформаций и разрушений пород на основе их физического зондирования. Разрабатывался метод расчета устойчивости незакрепленных горных выработок, сооружаемых в крепких горных породах с учетом ряда эксплуатационных и технологических факторов — формы и размера поперечного сечения выработки, отклонения реального контура от проектного и т. д.

Некоторые исследователи, изучая проблемы поддержания устойчивости горных выработок, проводимых комбайнами [4], рекомендовали численный метод расчета зоны нарушения сплошности породного массива, окружающего выработку круглого поперечного сечения, в зависимости от коэффициента бокового давления, прочностных параметров горных пород, глубины заложения выработки и некоторых других параметров. Предложена классификация участков подготовительной выработки по характеру работы крепи, графический метод оценки предельного состояния породного массива вокруг

выработки, исходя из условий плоско деформированного состояния массива при любой пространственной ориентировке поверхностей его ослабления.

В некоторых работах [5, 6] изложен ряд предложений по прогнозу степени устойчивости породных обнажений, где рассматривают условия перехода в предельное напряженное состояние пород вокруг основных типов выработок и их взаимодействие с установленной крепью выработок. Однако они не учитывают целый ряд горно-геологических и технологических факторов, влияющих на устойчивость.

Методикой ВНИМИ [7], рекомендованной для горизонтальных выработок угольных шахт, в качестве критерия устойчивости принимаются величины ожидаемых смещений на контуре сечения незакрепленной горной выработки на весь срок ее службы, исходя из взаимосвязи:

$$U = K_{\alpha} K_Q K_S K_B K_t U_t \quad (3)$$

где U_t — типовое смещение в выработке, определяемое по графику; K_{α} , K_Q , K_S , K_B , K_t , U_t — коэффициенты, учитывающие ряд горно-геологических и горнотехнических факторов.

Однако в этом методе недостаточно учтена взаимозависимость влияния факторов, оцениваемых коэффициентами, слабо учтено влияние обводненности, наличия геологических нарушений и некоторых других параметров.

В работах одних авторов [8, 9] в качестве показателя устойчивости принят параметр $\sigma_{сж} / \gamma H$, а в исследованиях других [10] предлагается оценивать устойчивость по величине параметра $\gamma H / 100f_{кр}$, где $f_{кр}$ — приведенный коэффициент крепости.

Существенным недостатком критериев типа $\sigma_{сж} / \gamma H$, $\gamma H / \sigma_{сж}$, показателей S , $\gamma H / 100f_{кр}$ является слабый учет влияния горно-геологических (трещиноватость, размокаемость, длительная прочность и др.) и технологических (размеры поперечного сечения выработки, допустимые величины породных обнажений и др.) факторов на устойчивость обнажений.

Некоторые авторы [11] рекомендуют

использовать коэффициент потенциальной статической устойчивости пород Π (далее — К.П.У.):

$$\Pi = \sigma_r / \gamma Hg. \quad (4)$$

Однако данный критерий также не учитывает ряд влияющих на устойчивость факторов (например, слоистости пород). Поэтому использование К.П.У. может быть эффективным только в определенных горно-геологических условиях, для которых была произведена обработка экспериментальных данных.

Проф. Н.С. Булычев [12] за критерий, определяющий устойчивость породных обнажений, принимает показатель:

$$S = f * (K_m K_r R_s / K_v K_t K_a K_{\alpha}), \quad (5)$$

где K_m , K_r , R_s , K_v , K_t , K_a , K_{α} — коэффициенты, характеризующие или учитывающие влияние ряда структурно-механических особенностей массива пород.

Одним из объективных методов прогноза устойчивости является предложенный институтом КузНИИшахтострой [13] критерий устойчивости типа:

$$n = \frac{R_{сж} K_{ст} K_w K_{дл}}{\gamma H K_{ф} K_{вл} K_{во}}, \quad (6)$$

где $K_{ст}$ — коэффициент структурно-текстурного ослабления; K_w — коэффициент, учитывающий снижение прочности пород i -го слоя при обводнении; $K_{дл}$ — коэффициент длительной прочности; $K_{ф}$ — коэффициент влияния формы сечения выработки; $K_{вл}$ — коэффициент взаимного влияния выработок; $K_{во}$ — коэффициент влияния очистных работ.

Этот критерий содержит практически все основные факторы, определяющие поведение массива на контуре выработки: прочность пород, структурно-механические особенности массива, форму и размеры сечения выработки, а также влияние горных работ.

Предложенная В.Ю. Изаксоном [14] методика прогноза устойчивости пород по условиям нарушения сплошности рекомендуется для массивов, обладающих резко

выраженными поверхностями ослабления. Однако в методике не отражено влияние важных технологических факторов (взаимное влияние выработок, влияние очистных работ и т. д.) и механических свойств пород. Следует отметить, что «условие, основанное на модели идеально хрупкого массива, согласно которой несущая способность породы исчерпывается сразу по достижении напряжением критического значения, не учитывает особенностей механического поведения пород в запредельном состоянии» [15]. Невыполнение данного условия говорит лишь о том, что разрушения должны иметь место, однако размеры последних условие не определяет. Поэтому для количественной оценки проявлений механических процессов в породном массиве в МГИ [13] был разработан критерий устойчивости типа:

$$q / R_{сж} = f(\lambda, \beta, \beta) \quad (7)$$

где q — равнокомпонентное начальное напряжение массива; β — соотношение модулей деформации в запредельном и допредельном состояниях; λ — коэффициент бокового распора; $R_{сж}$ — коэффициент поперечной деформации для запредельного состояния.

Использование данного критерия позволяет «учесть реальные особенности деформирования и разрушения горных пород в запредельном состоянии, так как несущая способность породных массивов зависит не только от прочностных свойств и уровня силового воздействия, но и от деформационных параметров, характеризующих закономерности разрушения этих массивов» [13].

В последнее время как в России, так и за рубежом проводятся обширные исследования, направленные на разработку классификаций породных массивов по различным показателям. Условно эти классификации можно разделить на две группы:

– классификации ВНИМИ [5], Булычева–Фотиевой [6], основанные только на прочностных или деформационных показателях свойств пород;

– классификации по инженерно-техническому состоянию, основанные на комплексной оценке большого числа влияющих факторов. Примерами могут служить классификации Бенявски, Гиленко, Булычева, Кундурова, Ерофеева [13] и др.

Так, по классификации ВНИМИ, в зависимости от величины и скорости смещений породы делятся на пять категорий (табл. 1). Несмотря на то, что эта классификация лежит в основе нормативных рекомендаций по креплению выработок, значения типовых смещений пород, вычисленные по графикам, являются лишь приближенными, так как зависят от правильности выбора расчетной схемы и выбранной математической модели проявлений горного давления.

Таблица 1
Классификация пород ВНИМИ

Категория устойчивости	Смещения U (мм) в породах	
	Осадочных	Изверженных
1–2	50	20
3	50–200	20–100
4	200–500	100–200
5	500	200

Классификация пород В.Ю. Изакона произведена по размерам условных зон нарушения сплошности породных обнажений и числу разрушений контактов. Классификация учитывает влияние поверхностей ослабления на проявления горного давления, однако она применима лишь в осадочных породах, обладающих резко выраженными поверхностями ослабления (слоистость, отдельность).

В классификации Булычева–Фотиевой [6] «степень устойчивости пород по абсолютному размеру условной зоны неупругих деформаций в качестве критерия принята максимальная протяженность условной зоны по нормали к контуру сечения выработки. В породах высоко устойчивых условная зона отсутствует. В породах устойчивых и средней устойчивости условные зоны локализуются на наиболее опасных участках контура сече-

ния выработки. В неустойчивых породах эта зона охватывает практически весь контур сечения выработки».

Принцип построения классификаций второй группы состоит в том, что вначале отбираются и группируются факторы, влияющие на инженерно-техническое состояние массива, затем каждому из этих факторов в зависимости от степени его важности присваивается численный показатель и по сумме показателей оценивается качество исследуемого массива. Существует ряд классификаций по устойчивости, характеризующих поведение пород при обнажении горными выработка-

ми. Наиболее распространено деление пород на пять категорий [16], которые легко определить на практике, не прибегая к каким-либо измерениям и инструментальным наблюдениям. Классификационными признаками являются «длительность обнажений пород без обрушений и вывалов, интенсивность (объем) разрушений пород, а также величины смещений пород внутрь выработки (табл. 2). Однако, нарушение устойчивости пород происходит в значительной степени случайно, поэтому указанные в табл. 2 признаки следует рассматривать как ориентировочные».

Таблица 2

Классификация устойчивости, характеризующая поведение пород [16]

Категория устойчивости пород	Степень устойчивости пород	Длительность обнажения пород	Интенсивность разрушения пород
1	Весьма устойчивые	Неограниченная	Отсутствует
2	Устойчивые	До 6 мес.	Обрушения отдельных кусков породы
3	Средней устойчивости	До 0,5 мес.	Локальные разрушения и на отдельные вывалы глубину до 1 м
4	Неустойчивые	До 1 сут	Разрушения охватывают большую часть контура и распростр. на глубину более 1 м
5	Весьма неустойчивые	Обрушение вслед за обнажением	Переходят в движение значительные массы пород

Использование критерия устойчивости, предложенного Л.М. Ерофеевым, позволили классифицировать условия работы крепей в зависимости от характера проявлений горного давления и характеристики системы «крепь – забутовка – массив» и установить связи между формами проявлений давления и условиями работы крепей. По этой классификации работы крепей подразделяются на

шесть классов, отличающихся друг от друга характером проявлений горного давления и режимом работы крепи.

При оценке устойчивости породных массивов, И.В. Баклашов и Б.А. Картозия [17] рекомендовали учитывать реальные особенности деформирования и разрушения горных пород и в запредельном состоянии (табл. 3).

Таблица 3

Классификация устойчивости по Баклашову–Картозии [17]

Степень устойчивости массива	Состояние массива пород
Устойчивый	Главные максимальные напряжения не превышают максимальной прочности пород на сжатие
Средней устойчивости	Породы переходят сначала в предельное, а затем в запредельное состояние. Породы частично разрушены и способны к самообрушению
Неустойчивый	Породы переходят из запредельного в состояние руинного обрушения

Вместе с тем, эта классификация — общий случай оценки устойчивости породных массивов. В ней не представляется возможным выделить отдельные факторы и степень их влияния на инженерно-техническое состояние горной выработки.

Тем не менее, в отличие от классификаций, основанных только на прочностных или деформационных показателях свойств пород, классификации по инженерно-техническому состоянию за счет дифференцированного подхода к сумме большого числа факторов позволяют существенно повысить надежность прогнозирования состояния массива, а, следовательно, и надежность проектных решений.

Проведенный анализ исследований по оценке устойчивости породных обнажений показывает, что такая оценка устойчивости

не всегда дает полноценные результаты, поскольку учет состояния породного массива в различных условиях разработки месторождений полезных ископаемых очень сложен. С переходом работ на нижние горизонты, вводом в эксплуатацию запасов с более тяжелыми горно-геологическими условиями, ростом с глубиной горного давления, увеличением площади поперечного сечения горных выработок изменяются условия эксплуатации месторождения. И поэтому необходим более полный учет состава, структуры, физических свойств вмещающих пород, закономерностей их сдвижения при геомеханическом обосновании способа проведения и охраны горных выработок, а также более полная оценка и обеспечение устойчивости породных обнажений при разработке месторождений полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цимбаревич П.М. Механика горных пород. М.: Горгеонефтеиздат, 1934. 121 с.
2. Литвинский Г.Г. Закономерности длительной прочности горных пород // Проблемы горного давления. 2015. № 1 (26). С. 94–106.
3. Нгуен Зуен Фон Прогнозирование оценки устойчивости породных зон пластических деформаций и их классификация // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S6-27. С. 16–24.
4. Ержанов Ж.С., Изаксон В.Ю., Станкус В.М. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости. Кемерово, 1976. 139 с.
5. Справочник инженера-шахтостроителя. М.: Недра, 1983. Т. 1. 439 с.
6. Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений на статические нагрузки и сейсмические воздействия на основе исследования упругой модели взаимодействия крепи с массивом пород // Проблемы механики подземных сооружений. Л.: ЛГИ, 1979. С. 3–8.
7. СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки (актуализированная редакция СНиП II-94-80). М., 2012. 58 с.
8. Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А. Повышение надежности крепи горных выработок. М.: Недра, 1989. 332 с.
9. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. М.: Стройиздат, 1983. 56 с.
10. Руководство по выбору крепи для выработок, проводимых комбайнами. Донецк, 1979. 64 с.
11. Попов В.Л. Проектирование строительства подземных сооружений и шахт. М.: Недра, 1989. 318 с.
12. Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982. 270 с.
13. Инструкция по проектированию крепей капитальных горных выработок для условий угольных шахт Кузбасса. Кемерово: Кузниишахтострой, 1978. 42 с.
14. Изаксон В.Ю. Об устойчивости незакрепленных горных выработок // В сб. Проектирование и строительство угольных предприятий. 1968. № 4 (112). С. 68–72.

15. Абдиев А.Р., Мамбетов Ш.А. Геомеханические процессы в породных массивах. Бишкек, 2001. 177 с.

16. Синегубов В.Ю. Геомеханическое обоснование способов обеспечения устойчивости выработок при проходке в рыхлых рудах вприсечку к закладочному массиву: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вячеслав Юрьевич Синегубов. Санкт-Петербург, 2012. 198 с.

17. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепи. М.: Недра, 1984. 415 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.60.42.003

UDC 622.235.5; 622.284.74

© V.Yu. Masayev, Yu.A. Masayev, 2021

V.Yu. MASAYEV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
KSAA, KuzSTU, Kemerovo
e-mail: masaev-62@mail.ru

Yu.A. MASAYEV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Professor KuzSTU, Kemerovo
e-mail: masaev-62@mail.ru

ANALYSIS OF SUSTAINABILITY ASSESSMENT RESEARCH ROCK OUTCROPS IN MINE WORKINGS

The development of mineral deposits by underground method is a traditional method of mining, which requires the construction of a whole complex of mine workings for various purposes. The rock mass is constantly in a stress state, depending on the conditions of formation, occurrence, the presence of stress-strain zones, the formed rock pressure and other factors. When conducting a complex of mine workings, the natural state of the rock mass is disturbed, and undesirable processes occur in the rock mass in the form of collapses of rocks into the mine, large displacements of its contour, and other phenomena that violate the stability of rock outcrops.

The loss of stability of rock outcrops leads to accidents with severe consequences, so research and development of measures to eliminate such consequences are constantly being conducted.

The article analyzes the studies of various authors on the development of criteria for the stability of rock outcrops, notes the shortcomings and some shortcomings, as well as the need to exclude the noted shortcomings.

Keywords: STABILITY OF ROCK OUTCROPS; ROCK COLLAPSE; STABILITY CRITERION; STRUCTURAL AND TEXTURAL WEAKENING; ROCK PRESSURE.

REFERENCES

1. Tsimbarevich P.M. Mechanics of rocks. Moscow. Gorgeonefteizdat, 1934. 121 p. [In Russ.].
2. Litvinsky G.G. Regularities of long-term strength of rocks // Problems of mountain pressure [Problemy gornogo davleniya]. 2015. No. 1 (26). P. 94–106. [In Russ.].
3. Nguyen Zuen Fon. Forecasting of the stability assessment of rock zones of plastic deformations and their classification // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2015. No. S6-27. P. 16–24. [In Russ.].

4. Yerzhanov Zh.S., Izakson V.Yu., Stankus V.M. Combine workings of Kuzbass mines. Experience in maintaining and calculating sustainability. Kemerovo, 1976. 139 p. [In Russ.].
5. Handbook of an engineer-mine builder. M.: Nedra, 1983. Vol. 1. 439 p. [In Russ.].
6. Fotieva N.N. Calculation of the support of underground structures for static loads and seismic effects based on the study of the elastic model of the interaction of the support with the rock mass // Problems of mechanics of underground structures. L.: LGI, 1979. P. 3–8. [In Russ.].
7. SP 91.13330.2012 Underground mining (updated version of SNiP II-94-80). M., 2012. 58 p. [In Russ.].
8. Erofeev L.M., Miroshnikova L.A. Improving the reliability of the support of mining operations. M.: Nedra, 1989. 332 p. [In Russ.].
9. Guide to the design of underground mining workings and the calculation of the support. M.: Stroyizdat, 1983. 56 p. [In Russ.].
10. Guide to the choice of support for workings carried out by combine harvesters. Donetsk, 1979. 64 p. [In Russ.].
11. Popov V.L. Design of construction of underground structures and mines. M.: Nedra, 1989. 318 p. [In Russ.].
12. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures. M.: Nedra, 1982. 270 p. [In Russ.].
13. Instructions for the design of supports for capital mine workings for the conditions of coal mines in Kuzbass. Kemerovo: Kuzniishakhtostroy, 1978. 42 p. [In Russ.].
14. Izakson V.Yu. On the stability of loose mining workings // In collection «Design and construction of coal enterprises». 1968. No. 4 (112). P. 68–72. [In Russ.].
15. Abdiev A.R., Mambetov Sh.A. Geomechanical processes in rock massifs. Training manual. Bishkek, 2001. 177 p. [In Russ.].
16. Sinegubov V.Yu. Geomechanical substantiation of methods for ensuring the stability of workings during sinking in loose ores in a cross-section to the laying array: dissertation ... Candidate of Engineering Sciences / Vyacheslav Yurievich Sinegubov. Saint-Petersburg, 2012. 198 p. [In Russ.].
17. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Mechanics of underground structures and support structures. M.: Nedra, 1984. 415 p. [In Russ.].