

МЕТОДИКА АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОПАСНОСТИ ОБРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Научная статья

Забабурин В.М.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-6383-1011;

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (v.zababurin[at]npi-tu.ru)

**Аннотация**

Выполнен анализ травматизма от обрушения горных пород в подготовительных забоях угольных шахт. Проанализированы условия применения буровзрывного способа проходки выработок. Сформулирована актуальность проблемы профилактики обрушений при проведении горных выработок. Рассмотрен традиционный подход оценки устойчивости горной выработки, основанный на учете глубины залегания и динамики горного давления. Выполнен анализ комплекса природных и технологических факторов, влияющих на процессы деформации, расслоения и обрушения пород. Предложены поправочные коэффициенты, учитывающие физико-механические свойства пород и технологию работ. Разработан методический подход определения вероятности обрушения пород непосредственной кровли выработки. Разработана методика анализа и оценки уровня риска травмирования работников от обрушения горных пород. Предложена эмпирическая шкала оценки риска травмирования от обрушений для условий угольных шахт.

**Ключевые слова:** обрушение горных пород, угольная шахта, вероятностный метод анализа, проходчик, опасность, травмирование, уровень риска.

METHODOLOGY FOR ANALYSING AND ASSESSING THE LEVEL OF ROCK COLLAPSE HAZARD DURING DRILLING AND BLASTING OF MINE EXCAVATIONS

Research article

Zababurin V.M.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-6383-1011;

<sup>1</sup> South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

\* Corresponding author (v.zababurin[at]npi-tu.ru)

**Abstract**

Traumatism from rock collapse in preparatory workings of coal mines is analysed. The conditions of application of drilling and blasting method of excavation are reviewed. The urgency of the problem of prevention of collapses in mine workings is formulated. The traditional approach to evaluate the stability of mine workings based on the depth of occurrence and dynamics of rock pressure is examined. The complex of natural and technological factors influencing the processes of deformation, delamination and collapse of rocks is analysed. Correction factors that take into account physical and mechanical properties of rocks and technology of works are suggested. A methodical approach to determine the probability of rock collapse in the immediate roof of the excavation is developed. The technique of analysing and assessing the level of risk of injury to workers from rock collapse is developed. An empirical scale for assessing the risk of injury from cave-ins in coal mines is proposed.

**Keywords:** rock collapse, coal mine, probabilistic method of analysis, tunneller, danger, injury, risk level.

**Введение**

Угледобывающие предприятия подземного типа традиционно относятся к объектам повышенной опасности. Так, на современных угольных шахтах РФ выполнение основных производственных процессов при проведении горных выработок сопряжено с высоким риском травмирования проходчиков. В частности, более 29% от общего числа травм происходит в подготовительных забоях вследствие обрушения горных пород. При этом уровень смертельного травматизма по данному фактору превышает 60%. Одной из основных причин обрушений пород кровли является нарушение паспорта крепления выработки (30%) [1]. Установлено также, что большинство обрушений происходит при выполнении работ по креплению выработок (34%), а также уборке породы и оформлению забоев (15%) [2].

Особенно часто этот травмирующий фактор проявляется при проведении горных выработок с помощью буровзрывных работ (далее – БВР). Удельный вес использования на практике такого способа проходки горных выработок на угольных шахтах РФ достаточно высок. В основном это связано со сложными горно-геологическими условиями разработки угольных месторождений (высокой крепостью вмещающих пород, наличием геологических нарушений и т.д.). Данный способ проведения горных выработок характеризуется ростом уровня производственной опасности, обусловленной значительной, как правило, глубиной разработки угольных месторождений, а также действием силы тяжести и проявлением горного давления. Основными причинами этого являются: невозможность применения механизированной крепи, значительный объем ручного труда при оформлении забоя и зачистке боков и почвы выработки, отсутствие надежной техники при монтаже рам крепи и проч.

В связи с этим проблема профилактики обрушений при проведении горных выработок с помощью БВР является актуальной для угольных шахт и требует оперативного решения.

### Состояние вопроса оценки устойчивости горной выработки

Как правило, при решении проблем в области безопасности в условиях горных объектов, в последнее время широко используются вероятностные методы анализа и оценки уровня производственной опасности [3], [4]. Проявляется эта тенденция и при решении задач, связанных с обоснованием и разработкой системы защиты подземных трудящихся от обрушения горных пород [5], [6]. Традиционный подход в вопросах обеспечения устойчивого состояния пород кровли в забое проводимой горной выработки состоит в императиве, что устойчивость горной выработки во многом определяется текущим состоянием пород непосредственной кровли, которое напрямую зависит от их физико-механических свойств и фактической глубины ведения горнопроходческих работ. Исходя из этого, вероятность устойчивого состояния пород непосредственной кровли горной выработки в период ее проведения с помощью БВР при отработке угольных шахт, с учетом только их физико-механических свойств, может быть ориентировочно определена из выражения

$$Q_y = \frac{R_{срс}}{P_r} \quad (1)$$

где  $R_{срс}$  – среднее расчётное сопротивление пород кровли на растяжение, МПа. Его значение напрямую зависит от геометрии исследуемой выработки и мощности породных слоев, составляющих ее непосредственную кровлю [7]. Непосредственная кровля угольных пластов шахт на 60-70% сложена из песчаных, песчано-глинистых и углеглинистых сланцев. В связи с этим, при средней крепости пород кровли равной 5-7 по шкале Протоdjeяконова величину  $R_{срс}$  при расчетах целесообразно принимать в диапазоне 2-3 МПа.

$P_r$  – горное давление или давление вышележающего массива горных пород, МПа. Определяется как

$$P_r = \gamma \cdot H \cdot 10^{-5}, \text{ МПа} \quad (2)$$

здесь  $\gamma$  – средняя плотность пород, кг/м<sup>3</sup>,  $H$  – глубина залегания горной выработки, м.

Средняя плотность вмещающих пород «выполняет роль» коэффициента пропорциональности между глубиной и давлением вышележающего массива горных пород. При неизменной плотности пород величина горного давления имеет тенденцию к возрастанию с увеличением глубины разработки полезного ископаемого. На рис. 1 представлена соответствующая прямолинейная зависимость.

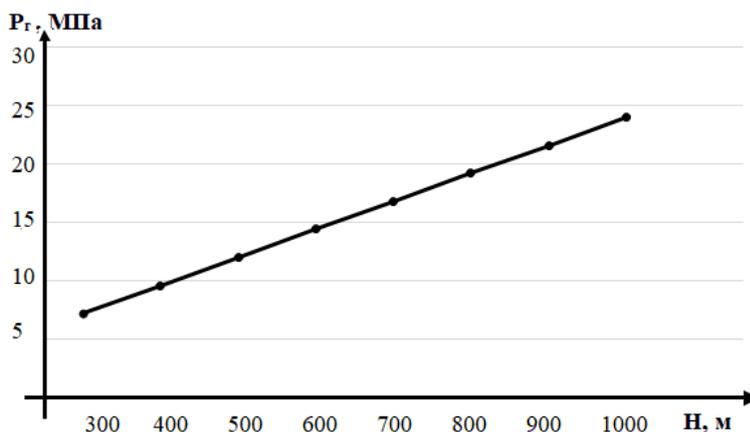


Рисунок 1 - Динамика горного давления при увеличении глубины работ

Упрощенные расчеты с учетом такого классического подхода дают результат, свидетельствующий о достаточно безопасной обстановке на рабочих местах проходчиков, что противоречит официальной статистике по травматизму из-за обрушения пород кровли [5], [6].

На наш взгляд, более объективным подходом в этом актуальном для горной промышленности вопросе является вариант, базирующийся на комплексном учете специфики горно-геологических условий, состава и особенностей выполнения операций проходческого цикла в рассматриваемых условиях, а также влияния «человеческого фактора», проявляющегося в виде ошибок и нарушений работающими требований нормативно-технической документации.

### Методология анализа и оценки уровня опасности обрушения горных пород

Для практической реализации предложенного подхода выполнен анализ комплекса природных и технологических факторов, объективно влияющих на процессы деформации, расслоения и обрушения пород непосредственной кровли при проведении подготовительных выработок с помощью БВР на угольных шахтах. Установлено, что к числу основных влияющих факторов относятся: условия залегания пласта, форма и геометрия выработки, свойства горных пород, технология проходки выработки, типы используемого горнопроходческого оборудования и др.

Исходя из этого, при оценке состояния пород непосредственной кровли горной выработки следует оперировать следующими поправочными коэффициентами:

1.  $K_{фен}$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства горных пород;
2.  $K_{бвр}$  – коэффициент, учитывающий технологию проходки горной выработки.

Физический смысл коэффициента  $K_{фен}$  состоит в комплексном учете характеристик исследуемых пород, определяющих такие их свойства, как длительная прочность, сумма растягивающих напряжений, величина бокового распора в массиве и проч. Численное значение этого поправочного коэффициента можно определить по формуле

$$K_{\phi r n} = \frac{\xi}{K_{p n} \cdot \lambda} \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент длительной прочности пород. Для кровель, сложенных сланцами различного вида, его величина колеблется в пределах 0,5-0,6;

$K_{p n}$  – коэффициент растягивающих напряжений в породах кровли. Величина его зависит от формы поперечного сечения выработки и коэффициента крепости пород, составляющих ее непосредственную кровлю. Рекомендуется при трапецевидной форме выработки принимать  $K_{p n} = 1$ , при использовании арочной формы –  $K_{p n} = 0,67$ ;

$\lambda$  – коэффициент бокового распора. Величина этого параметра зависит от отношения вязких и упругих составляющих деформаций, которые скачкообразно меняются с глубиной. Для расчетов значение коэффициента бокового распора в массиве горных пород следует принимать равным 0,33.

Ещё один поправочный коэффициент  $K_{бвр}$  учитывает особенности выполнения и состав технологических операций проведения горной выработки буровзрывным способом. Для условий современных шахт величина этого коэффициента может быть определена из выражения

$$K_{бвр} = 1,25K_p \cdot K_c \quad (4)$$

где  $K_p$  – поправочный коэффициент, учитывающий степень расслоения пород. Численные значения коэффициента  $K_p$  определяются эмпирическим путем (по результатам геоакустических спектральных измерений), лежат в широком диапазоне от 0,1 до 1 и зависят от количества и мощности породных слоев [8];

$K_c$  – коэффициент, учитывающий структурное ослабление пород непосредственной кровли выработки после проведения БВР. Принимается из диапазона 0,3-1,0 с учетом крепости пород, геометрии выработки и основных параметров паспорта БВР [9].

Исходя из представленных выше рассуждений, вероятность устойчивого состояния пород непосредственной кровли горной выработки, проводимой с помощью БВР, может быть определена из выражения

$$Q_y = \frac{R_{срс} \cdot K_{фгп} \cdot K_{бвр}}{P_2} \quad (5)$$

С учетом того факта, что суммарная вероятность двух несовместных событий всегда равна единице, вероятность обрушения пород кровли горной выработки может быть ориентировочно определена по формуле [10]:

$$P_{обр} = 1 - Q_y \quad (6)$$

На основании предложенного методического подхода определения вероятности обрушения пород непосредственной кровли выработки можно рассчитать величину риска травмирования проходчиков от обрушений пород. Для этого, на наш взгляд, следует наряду с анализом природных и технологических факторов учитывать эргономический. В частности, при оценке риска травмирования от обрушений предлагается использовать поправочный коэффициент, учитывающий возможные ошибки и нарушения проходчиков при выполнении ими технологических операций по проведению горной выработки. Это важно, т.к. по статистике 52% травм происходит вследствие проявления «человеческого фактора», а именно – недисциплинированности и недооценки работниками производственной опасности [11]. Кроме того, следует учесть объективный факт присутствия работающих в призабойном пространстве выработки, обусловленный производственной необходимостью. В соответствии с проведенным хронометражом в подготовительных забоях время нахождения людей в потенциально опасных зонах может достигать 50% от продолжительности рабочей смены. С учетом этих условий риск травмирования может быть определен из следующего выражения

$$P_{тр} = \frac{\Delta K \cdot P_{обр}}{2} \quad (7)$$

где  $\Delta K$  – поправочный коэффициент, повышающий уровень риска травмирования проходчиков от обрушений на 20-25% при наличии зафиксированных ошибок и нарушений при выполнении технологических операций проходческого цикла.

Для оценки уровня риска травмирования проходчиков обрушающимися породами разработана и предлагается к практическому использованию эмпирическая пятиуровневая шкала, представленная в таблице 1.

Таблица 1 - Оценочная шкала риска травмирования от обрушений

| Класс опасности | Уровень риска травмирования | Риск травмирования от обрушений | Практические рекомендации и срочность их выполнения                    |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 1               | Допустимый                  | Менее 0,1                       | Допускается работа в нормальном режиме                                 |
| 2               | Низкий                      | 0,11-0,2                        | Необходимо повышенное внимание при выполнении работ                    |
| 3               | Значительный                | 0,21-0,4                        | Рекомендуется анализ текущей обстановки и разработка защитных мер (при |

|   |             |           |   |
|---|-------------|-----------|---|
|   |             |           | необходимости)  |
| 4 | Высокий     | 0,41-0,6  | Требуется применение дополнительных средств защиты от обрушения. Работы могут быть остановлены в любой момент |
| 5 | Критический | Более 0,6 | Немедленная остановка работ и введение корректив по нормализации обстановки                                   |

Для оценки уровня риска травмирования проходчиков обрушающимися породами разработана и предлагается к практическому использованию эмпирическая пятиуровневая шкала. Она позволяет ранжировать степень опасности в забое выработки по уровням риска, а также дает практические рекомендации по нормализации обстановки и срочности их выполнения, определяя тем самым стратегию мер по обеспечению приемлемого уровня производственной безопасности при проходке выработки с помощью БВР.

#### **Заключение**

Таким образом, предложенный методический подход анализа и оценки степени устойчивости непосредственной кровли горной выработки позволит определить вероятность обрушения пород и повысить эффективность мероприятий по снижению риска травмирования проходчиков в призабойном пространстве выработки. В широком смысле, методику и полученные на ее основе результаты анализа и оценки риска травмирования от обрушения пород целесообразно использовать в качестве информационно-методической основы для ранжирования производственных процессов по уровню опасности [12], а также для повышения эффективности управления безопасностью труда на угольных шахтах [13].

#### **Конфликт интересов**

Не указан.

#### **Conflict of Interest**

None declared.

#### **Рецензия**

Андреева Е.С., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### **Review**

Andreeva E.S., Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### **Список литературы / References**

1. Костеренко В.Н. Анализ причин обрушений с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий / В.Н. Костеренко, О.В. Воробьева // Горный информационный аналитический бюллетень. — 2017. — № 6. — С. 74-90.
2. Цыганков Д.А. Профилактика аварийности как следствия горных ударов в рудных и угольных шахтах / Д.А. Цыганков // Международный журнал экспериментального образования. Технические науки. — 2016. — № 3. — Ч. 1. — С. 99-104.
3. Баскаков В.П. Оценка рисков аварий, инцидентов и несчастных случаев. Планы управления безопасностью труда / В.П. Баскаков, В.И. Ефимов, Г.И. Сенаторов // Известия ТулГУ. Науки о земле. — 2011. — Вып. 1. — С. 22-35.
4. Рудаков М.Л. Оценка и управление рисками в современных системах управления охраной труда в организации / М.Л. Рудаков. — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2014. — 110 с.
5. Кольвах К.А. Оценка величины индивидуального риска и риска группового несчастного случая работников угольных шахт при обрушении горных пород / К.А. Кольвах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2021. — № 2. — С. 63-67.
6. Фролов А.В. Количественная оценка опасностей при различных технологических схемах и производственных операциях / А.В. Фролов, В.М. Забабурин, И.В. Чефранов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 9. — С. 23-24.
7. Борщ-Компониец В.И. Практическая механика горных пород / В.И. Борщ-Компониец. — Москва: Горная книга, 2013. — 321 с.
8. Чефранов И.В. Установление индивидуального риска обрушения пород при проведении выработок / И.В. Чефранов // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 4. — С. 23-26.
9. Литвинский Г.Г. Методические указания к изучению курса «Механика подземных сооружений» – Устойчивость породных обнажений горных выработок (для студентов горных специальностей) / Г.Г. Литвинский. — Алчевск: ДонГТУ, 2013. — 40 с.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. — М.: Высшее образование, 2006. — 479 с.
11. Баловцев С.В. Управление производственными рисками на угольных шахтах на основе ранжирования требований безопасности / С.В. Баловцев, О.В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 12. — С. 15-20

12. Фролов А.В. Оценка уровня риска проявления опасностей и возможных последствий на шахтах Восточного Донбасса / А.В. Фролов, В.М. Забабурин // Безопасность жизнедеятельности: матер. XI Междунар. науч. чтений МАНЭБ и Междунар. науч.-метод. конф. Новочеркасск, 24-26 мая 2007 г. — Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2007. — С. 179-187.

13. Забабурин В.М. Совершенствование методологии управления безопасностью труда на угольных шахтах / В.М. Забабурин, А.В. Фролов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — Вып. 12. — С. 9-15.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kosterenko V.N. Analiz prichin obrushenij s cel'ju povyshenija jeffektivnosti sistemy upravlenija bezopasnost'ju truda ugledobyvajushhh predpriyatij [An Analysis of the Causes of Collapses to Improve the Effectiveness of the Labour Safety Management System of Coal Mining Enterprises] / V.N. Kosterenko, O.V. Vorob'eva // Gornyj informacionnoj analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2017. — № 6. — P. 74-90. [in Russian]

2. Cygankov D.A. Profilaktika avarijnosti kak sledstviya gornyh udarov v rudnyh i ugol'nyh shahtah [Accident Prevention as a Consequence of Impacts in Ore and Coal Mines] / D.A. Cygankov // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija. Tehnicheskie nauki [International Journal of Experiential Education. Technical Sciences]. — 2016. — № 3. — Pt. 1. — P. 99-104. [in Russian]

3. Baskakov V.P. Ocenka riskov avarij, incidentov i neschastnyh sluchaev. Plany upravlenija bezopasnost'ju truda [A Risk Assessment of Accidents, Incidents and Incident Risks. Occupational Safety Management Plans] / V.P. Baskakov, V.I. Efimov, G.I. Senatorov // Izvestija TulGU. Nauki o zemle [Proceedings of TulSU. Earth Sciences]. — 2011. — Iss. 1. — P. 22-35. [in Russian]

4. Rudakov M.L. Ocenka i upravlenie riskami v sovremennyh sistemah upravlenija ohranoj truda v organizacii [A Risk Assessment and Management in Modern Occupational Health and Safety Management Systems in an Organization] / M.L. Rudakov. — Saint Petersburg: Svoe Publishing House, 2014. — 110 p. [in Russian]

5. Kol'vah K.A. Ocenka velichiny individual'nogo riska i riska gruppovogo neschastnogo sluchaja rabotnikov ugol'nyh shaht pri obrushenii gornyh porod [An Estimation of Individual Risk and Group Accident Risk of Coal Mine Workers in the Event of Rock Collapse] / K.A. Kol'vah // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti [Bulletin of the Scientific Centre for Work Safety in the Coal Industry]. — 2021. — № 2. — P. 63-67. [in Russian]

6. Frolov A.V. Kolichestvennaja ocenka opasnostej pri razlichnyh tehnologicheskikh shemah i proizvodstvennyh operacijah [Quantification of Hazards in Various Process Flow Diagrams and Production Operations] / A.V. Frolov, V.M. Zababurin, I.V. Chefranov [et al.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2005. — № 9. — P. 23-24. [in Russian]

7. Borshh-Komponiec V.I. Prakticheskaja mehanika gornyh porod [Practical Rock Mechanics] / V.I. Borshh-Komponiec. — Moscow: Mining Book, 2013. — 321 p. [in Russian]

8. Chefranov I.V. Ustanovlenie individual'nogo riska obrushenija porod pri provedenii vyrabotok [Determination of the Individual Risk of Rock Collapse in Mine Excavations] / I.V. Chefranov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2001. — № 4. — P. 23-26. [in Russian]

9. Litvinskij G.G. Metodicheskie ukazaniya k izucheniju kursa «Mehanika podzemnyh sooruzhenij» – Ustojchivost' porodnyh obnazhenij gornyh vyrabotok (dlja studentov gornyh special'nostej) [Methodological Instructions for Studying the Course "Mechanics of Underground Structures" – Stability of rock Exposures of Mine Workings (for students of mining specialities)] / G.G. Litvinskij. — Alchevsk: DonSTU, 2013. — 40 p. [in Russian]

10. Gmurman V.E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics] / V.E. Gmurman. — M.: Higher Education, 2006. — 479 p. [in Russian]

11. Balovcev S.V. Upravlenie proizvodstvennymi riskami na ugol'nyh shahtah na osnove ranzhirovanija trebovanij bezopasnosti [Management of Production Risks at Coal Mines on the Basis of Safety Requirements Ranking] / S.V. Balovcev, O.V. Vorob'eva // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2016. — № 12. — P. 15-20 [in Russian]

12. Frolov A.V. Ocenka urovnja riska projavlenija opasnostej i vozmozhnyh posledstvij na shahtah Vostochnogo Donbassa [An Assessment of the Risk Level of Hazards and Possible Consequences at Eastern Donbass Mines] / A.V. Frolov, V.M. Zababurin // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti: mater. XI Mezhdunar. nauch. chtenij MANJeB i Mezhdunar. nauch.-metod. konf. Novoчеркасск, 24-26 maja 2007 g. [Safety of Life Activity: Mater. XI Intern. Scientific Readings of IASES and Intern. Scientific-Methodical Conf. Novoчеркасск, May 24-26, 2007]. — Novoчеркасск: SRSPU(NPI), 2007. — P. 179-187. [in Russian]

13. Zababurin V.M. Sovershenstvovanie metodologii upravlenija bezopasnost'ju truda na ugol'nyh shahtah [Improvement of Labour Safety Management Methodology at Coal Mines] / V.M. Zababurin, A.V. Frolov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2009. — Iss. 12. — P. 9-15. [in Russian]