ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.23
DOI: 10.46698/VNC.2026.65.28.001

Оригинальная статья

Методика расчета параметров комбинированной крепи выработок в условиях неустойчивого массива

Т.Ф. Харисов, А.Е. Балек, Д.В. Прищепа, Д.А. Коптяков, Н.А. Масальский

Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620075,
г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Статья поступила: 02.03.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: 11.09.2026

Резюме: Актуальность работы обусловлена тем, что действующие нормативные документы не обеспечивают адекватных методов расчета для крепления подготовительно-нарезных горных выработок, эксплуатируемых в неустойчивых скальных массивах IV–V категорий и в зонах влияния очистных работ. Это приводит либо к рискам обрушения из-за недостаточной прочности крепи, либо к значительному удорожанию работ из-за её необоснованного усиления. **Цель работы**: разработка усовершенствованной, комплексной методики расчета параметров комбинированной крепи, которая включает анкерную, набрызгбетонную и металлическую арочную (СВП) крепь. Методика должна обеспечивать надежность конструкции с заданным коэффициентом запаса и оптимизировать материальные затраты. **Методы.** На основе анализа физико-механических свойств пород и данных склерометрии были установлены ключевые корреляции. Для расчета нагрузки использовалась модель хрупко-разрушающейся среды, а для учета влияния очистных работ – методы трехмерного численного моделирования и GEP-анализ для определения коэффициента концентрации напряжений. Расчет комбинированной крепи выполняется поэтапно: сначала определяется упрочнение массива от анкерования по эмпирическим зависимостям, затем рассчитывается нагрузка, и, наконец, методом конечных элементов подбираются параметры поддерживающей крепи (набрызгбетон, СВП). **Результаты исследования.** На примере расчетов для выработок шириной 5 и 6 м в различных горно-геологических условиях продемонстрирована эффективность методики. Методика позволяет обоснованно выбирать параметры комбинированной крепи, обеспечивая ее устойчивость с коэффициентом запаса, и оптимизировать затраты на крепление. Отмечены текущие ограничения метода, связанные с максимальной длиной канатных анкеров (5 м) и использованием характеристик бетона класса B25, которые планируется устранить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: несущая способность крепи, комбинированная крепь, неустойчивый горный массив, коэффициент упрочнения, скальный массив.

Благодарности: *Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 075-00408-26-00. № гос. рег. 123012300007-7.*

Для цитирования: Харисов Т.Ф., Балек А.Е., Прищепа Д.В., Коптяков Д.А., Масальский Н.А. Методика расчета параметров комбинированной крепи выработок в условиях неустойчивого массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): 252–263. DOI: 10.46698/VNC.2026.65.28.001

GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

DOI: 10.46698/VNC.2026.65.28.001

Original paper

Method for calculating the parameters of combined support for mine workings in an unstable rock mass

T.F. Kharisov, A.E. Balek, D.V. Prishchepa, D.A. Koptyakov, N.A. Masalskiy

Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
58 Mamina-Sibiryaka Str., Yekaterinburg 620075, Russian Federation,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Received: 02.03.2026, revised: 10.09.2026, accepted: 11.09.2026

Abstract: Relevance. The study is driven by the fact that current regulatory documents do not provide adequate calculation methods for supporting development and preparatory mine workings in unstable rock masses of stability categories IV–V and within zones affected by stoping operations. This leads either to collapse risks due to insufficient support strength or to significant cost overruns due to unjustified over-reinforcement. **Aim.** To develop an improved, comprehensive methodology for calculating the parameters of a combined support system comprising rock bolting, shotcrete, and steel arch (SVP) support. The methodology should ensure structural reliability with a specified safety factor and optimize material costs. **Methods.** Key correlations were established based on the analysis of rock physico-mechanical properties and sclerometric data. The load calculation employed a brittle-fracturing medium model, while the influence of stoping operations was accounted for using 3D numerical modeling methods and GEP analysis to determine the stress concentration factor. The combined support calculation is performed in stages: first, rock mass strengthening from bolting is determined using empirical dependencies; then, the load is calculated; and finally, the parameters of the ground support (shotcrete, SVP arches) are selected using the finite element method. **Results.** The methodology's effectiveness was demonstrated through calculations for 5 m and 6 m wide workings under various mining and geological conditions. It enables a well-founded selection of combined support parameters, ensuring its stability with a safety factor and optimizing support costs. Current limitations of the method are noted, related to the maximum cable bolt length (5 m) and the use of characteristics for B25 class concrete, which are planned to be addressed in future research.

Keywords: load-bearing capacity of support, combined support, unstable rock mass, strengthening coefficient, rock mass.

Acknowledgments: *This work was carried out within the framework of the state assignment No. 075-00408-26-00 (state registration No. 123012300007-7).*

For citation: Kharisov T.F., Balek A.E., Prishchepa D.V., Koptyakov D.A., Masalskiy N.A. Method for calculating the parameters of combined support for mine workings in an unstable rock mass. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): 252–263. DOI: 10.46698/VNC.2026.65.28.001

Введение

В горной промышленности, обеспечение устойчивости и безопасности горных выработок является ключевой задачей, напрямую влияющей на эффективность добычи полезных ископаемых и сохранность жизни персонала. Крепление горных выработок как основной способ поддержания их формы и предотвращения обрушений играет в этом процессе определяющую роль. Разработка и внедрение эффективных и надежных

методик расчета параметров крепи – сложная и актуальная научно-техническая задача, требующая учета множества факторов, в первую очередь, смещений массива горных пород и нагрузок, воздействующих на крепь. Недостаточная несущая способность крепи может привести к деформациям, разрушениям и, как следствие, к аварийным ситуациям. В то же время, избыточное усиление конструкции крепи ведет к неоправданным затратам на материалы и трудоемкость работ.

В условиях скальных массивов ключевым нормативным документом, регламентирующим методику расчета смещений приконтурного массива и нагрузок на крепь горных выработок, является «СП 91.13330.2012. Свод правил. Подземные горные выработки». Однако данный свод правил предписывает, что для слабоустойчивых пород IV-й категории и ниже, а также для выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ, расчет проектных параметров и смещений породных стенок, кровли и почвы должен выполняться с привлечением специализированных организаций, имеющих соответствующие методики и опыт.

Следовательно, СП 91.13330.2012 подходит лишь для капитальных горных выработок в устойчивых массивах. В условиях неустойчивых массивов (IV–V категории) и подготовительно-нарезных выработок в зоне влияния очистных работ необходима альтернативная методика расчета смещений, нагрузок и параметров крепи, учитывающая дополнительные факторы, влияющие на устойчивость системы «крепь-массив».

Многолетние исследования, подтвержденные опытом горнорудных предприятий, показывают, что для скальных массивов IV–V категории устойчивости наиболее подходящей является модель хрупко-разрушающейся среды [Балек и др., 2024; Головин и др., 2024; Корчак, 2021; Плешко и др., 2020; Плешко и др., 2022]. Применение данной модели позволяет использовать аналитические решения плоской геомеханической задачи для расчета радиуса зоны неупругого деформирования (нарушенной зоны) r:

$$r = R\left[\frac{\beta(2q - [\sigma]) + (\beta+2)[\sigma_o]}{(\beta+2)(\beta P + [\sigma_o])}\right]^{1/\beta}; \quad (1)$$

Внешняя максимальная нагрузка на крепь определяется исходя из веса налегающих разрушенных пород в зоне неупругих деформаций $P_в$:

$$P_в = \gamma(r - R), \quad (2)$$

где r – радиус (от центральной оси выработки) зоны неупругого деформирования массива, м;

$R = (S/\pi)^{0,5}$ – эквивалентный радиус рассматриваемой выработки с площадью поперечного сечения S в проходке (вчерне), м;

q – главные максимальные напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) в массиве в районе проходки выработки, МПа. Если выработка проходится в нетронутом массиве, то главные максимальные напряжения равняются природным напряжениям $q = q_{i\partial}$. Если выработка находится в зоне влияния очистных работ, q определяется по формулам (3, 4);

β – параметр линеаризации, огибающей кругов Кулона-Мора;

φ – угол внутреннего трения;

μ – коэффициент Пуассона;

σ – предел прочности (на одноосное сжатие) вмещающего выработку породного массива вне зоны неупругих деформаций, МПа;

σ_o – предел остаточной прочности (на одноосное сжатие) нарушенного массива вмещающих пород в зоне неупругих деформаций, МПа;

P – реактивный отпор поддерживающей крепи, численно равный ее несущей способности, МПа;

γ – объемный вес породного массива в зоне неупругих деформаций.

Материалы и методы

Для усовершенствования приведенной аналитической формулы расчета радиуса зоны неупругого деформирования, которая не учитывает вторичное поле напряжений, вызванное ведением очистных работ, и не может применяться в расчетах максимальной нагрузки на крепь для подготовительно-нарезных выработок, выполнена оценка напряженно-деформированного состояния массива вблизи очистных выработок методом численного объемного моделирования [Качурин и др., 2024; Матаев и др., 2023; Муратбакеев, Судариков, 2021; Голик и др., 2021].

В процессе поэтапного моделирования оценивались главные максимальные напряжения в массиве σ1 на различном расстоянии от очистного пространства L и его размеры по осям XYZ.

Для выявления нелинейной зависимости использовался GEP-метод [Behnia et al., 2017; Candida, 2002; Dehghani et al., 2021; Monjezi et al., 2021; Ozbek et al., 2013; Shirani et al., 2017; Zhang et al., 2023]. Изменение напряжений выражается через коэффициент концентрации *K:*

$$K = \frac{q}{q_{np}}, \tag{3}$$

где q – главные максимальные напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) в массиве в зоне влияния очистных работ, МПа.

q_{np} – природные (исходные) напряжения (для условий объемного равнокомпонентного поля) окружающего породного массива в районе проходки выработки, МПа.

$$K = \left(\frac{1}{0{,}1 \cdot (L - y - 2{,}23)} + 0{,}97 + \frac{z}{x(y - 13{,}9)} + \frac{1}{1{,}26 / y^{1/4} + 9{,}2 \cdot L / x} \right), \tag{4}$$

где K – коэффициент концентрации напряжений в массиве;
q – главные максимальные напряжения в массиве, МПа;
x – размер выработанного (очистного) пространства по оси X, м;
y – размер выработанного (очистного) пространства по оси Y, м;
z – размер выработанного (очистного) пространства по оси Z, м;
L – расстояние от контура выработанного (очистного) пространства, м.

Анализ существующих методик расчета параметров крепи показал, что аналитические формулы ориентированы на отдельные типы крепежных конструкций [Габараев и др., 2020; Масаев, Масаев, 2023]. Однако комплексный подход к расчету параметров комбинированной крепи, включающей, например, набрызгбетон, металлическую сетку, анкерную крепь различного типа (в том числе канатные анкеры) и т.д., в настоящее время не имеет унифицированного методического обеспечения.

Сложность заключается в необходимости учета комбинированного взаимодействия нескольких типов крепей различной жесткости и их совместного усиливающего воздействия на обеспечение устойчивости приконтурного массива.

Предложенная авторами методика расчета параметров крепи сводится к обеспечению гарантии того, что в течение эксплуатации крепь не будет разрушена, то есть будет соблюдаться условие прочности:

$$P_p \leq \sum R_p \,, \tag{5}$$

где P_p – расчетная нагрузка на крепь, МПа;
R_p – расчетная несущая способность крепи, МПа.

Суммарная несущая способность комбинированной крепи не может быть корректно определена как сумма значений несущей способности различных типов крепи (набрызгбетон, анкера, металлические рамы СВП и т.д.), так как они обладают разной жесткостью (модулем упругости).

Авторами предлагается методика расчета параметров комбинированной крепи, учитывающая влияние различных видов анкерной и поддерживающей крепи на устойчивость вмещающего массива через коэффициенты упрочнения. Методика основана на зависимости упрочнения массива от параметров анкерной крепи (длина анкера, сетка анкерования, несущая способность анкера), полученной по данным модельных испытаний проф. Г.И. Краченко и канд. техн. наук О.В. Тимофеева (рис. 1). Натурные исследования и практика горных работ свидетельствуют, что армированный анкерами массив не теряет своей несущей способности даже при его разрушении, а эффект применения анкерной крепи проявляется, в первую очередь, в упрочнении окружающих выработку пород, армированных анкерами.

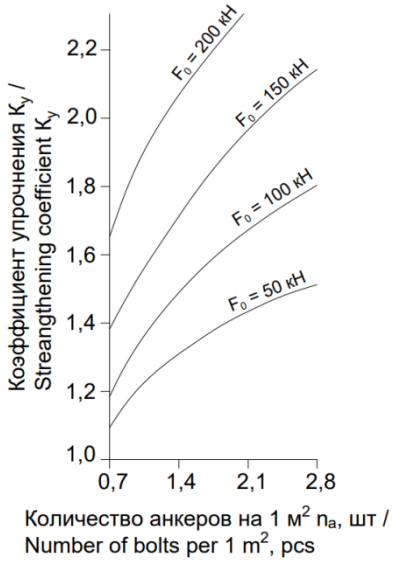

Рис. 1. Зависимость коэффициента упрочнения пород от числа анкеров и их несущей способности: n_a – количество анкеров на 1 м^2, шт., F_0 – несущая способность анкера, кН /

Fig. 1. Dependence of the rock strengthening coefficient on the number of bolts and their load-bearing capacity: n_a – number of bolts per 1 m^2, pcs., F_0 – bolt load-bearing capacity, kN

Анкерная крепь с заданными параметрами позволяет сшить структурные блоки массива, повысить предел его прочности и категорию устойчивости массива. На основании категории устойчивости закрепленного анкерной крепью массива, действующих напряжений и параметров выработки рассчитывается нагрузка на крепь. Исходя из значений нагрузок, рассчитанных по формулам 1–2, подбирается соответствующий тип и параметры поддерживающей крепи, несущая способность которой превышает расчетные нагрузки со стороны массива.

В качестве поддерживающей крепи может выступать металлическая рамная, набрызгбетонная, бетонная, и др. типы крепи. Несущая способность металлической рамной крепи из профиля СВП может быть принята из справочного материала.

Несущую способность набрызгбетонной крепи необходимо оценивать так же, как несущую способность конструкции, поскольку она зависит от ее формы, толщины и характеристик бетона. Значения несущей способности набрызгбетонной и бетонной крепи в справочном материале отсутствуют, поэтому для их оценки построен ряд конечно-элементных моделей конструкций крепи для выработок от 3 до 8 метров ши-

риной сводчатой формы поперечного сечения и с разной толщиной крепи от 100 до 500 мм. При толщине крепи менее 100 мм ее несущая способность не оценивалась, так как при данной толщине набрызгбетон применяется как изолирующее покрытие, а при толщине более 100 мм как самостоятельная поддерживающая крепь (несущая конструкция).

Кроме того, расчетам несущей способности подвергалась набрызгбетонная крепь, армированная фиброволокном, металлической сеткой с диаметром прутка 6 и 12 мм с размером ячейки 100х100 мм.

При поэтапных расчетах по мере увеличения внешней нагрузки на конструкцию крепи оценивались сжимающие и растягивающие напряжения, возникающие в бетоне класса В25, а также продольные силы, изгибающие моменты и сдвигающие силы, возникающие в бетоне и металлической арматуре (сетке), с целью определения оптимальных нагрузок, при которых полученные значения близки к предельным.

Результаты исследования

Предельные значения прочности бетона при сжатии и растяжении представлены в таблице 1. Предельные осевые усилия, моменты металлической сетки и результаты расчетов представлены на рисунках 2–3.

Таблица 1 / Table 1

Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и марками /
Correlation between concrete strength classes in compression and tension, and grades

Класс бетона по прочности / Concrete strength class	Средняя прочность бетона, МПа / Average concrete strength, MPa	Ближайшая марка бетона по прочности / Nearest concrete grade by strength
Сжатие / Compression		
B22,5	29	M300
B25	33	M350
B30	39	M400
B35	46	M450
Растяжение при изгибе / Flexural tensile strength		
B_{tb}2,0	2,62	P_{tb}25
B_{tb}2,4	3,1	P_{tb}30
B_{tb}2,8	3,6	P_{tb} 35
B_{tb}3,2	4,2	P_{tb} 40

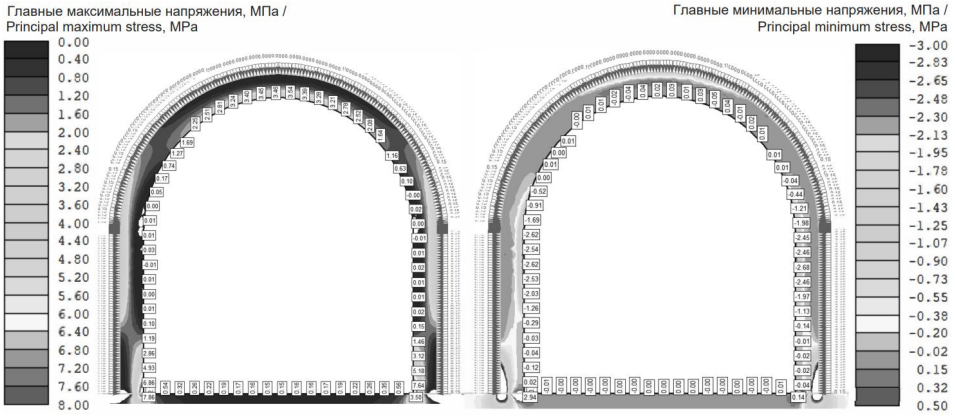

Рис. 2. Главные максимальные (сжимающие) и главные минимальные (растягивающие) напряжения на контуре набрызгбетонной крепи выработки шириной 4 м при нагрузке 0,15 МПа /

Fig. 2. Principal maximum (compressive) and principal minimum (tensile) stresses on the contour of the 4 m wide excavation with shotcrete lining under a load of 0.15 MPa

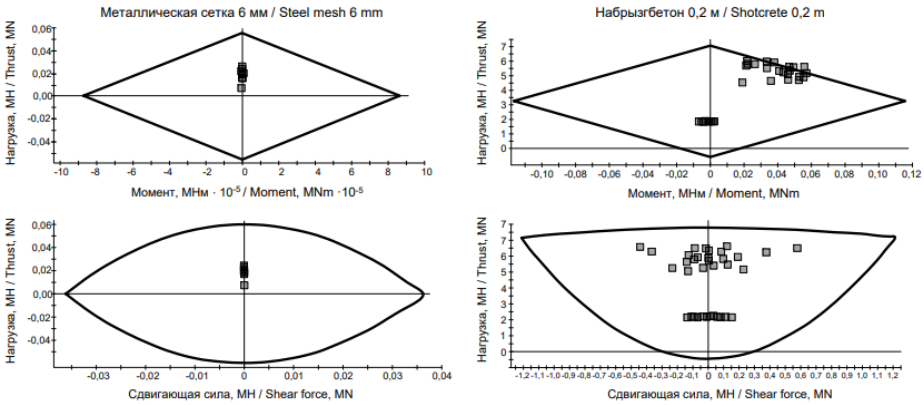

Рис. 3. Паспорт несущей способности набрызгбетонной крепи, армированной металлической сеткой/

Fig. 3. Load-bearing capacity diagram of the shotcrete lining reinforced with steel mesh

Расчеты выполнены для набрызгбетонной, фибро-набрызгбетонной и набрызгбетонной крепи, армированной металлической сеткой толщиной 6 мм и 12 мм. Результаты моделирования представлены в виде диаграмм с зависимостью несущей способности крепи от параметров крепи и размеров выработки на рисунках 4–5.

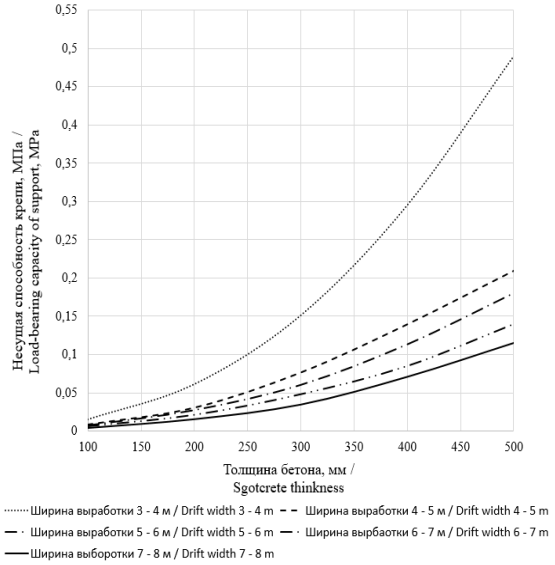

Рис. 4. Несущая способность набрызгбетонной крепи / Fig. 4. Load-bearing capacity of shotcrete support

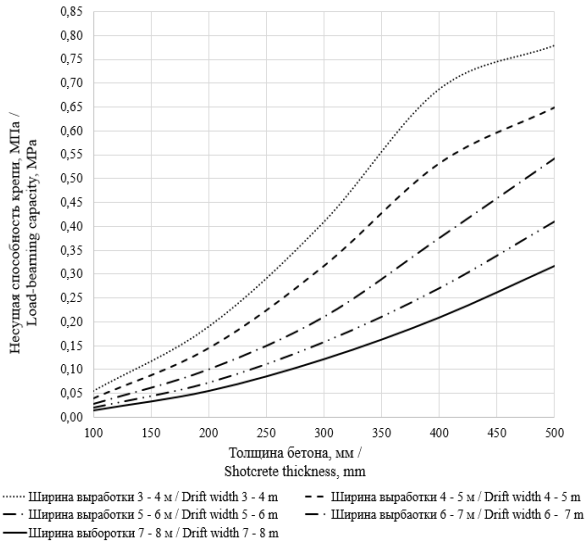

Рис. 5. Несущая способность набрызгбетонной крепи с арматурой 6 мм / Fig. 5. Load-bearing capacity of shotcrete support reinforced with 6 mm reinforcement

В качестве примера в таблице 2 представлена схема расчета комбинированной крепи для подготовительно-нарезных выработок шириной 5 и 6 метров, находящихся в различных горно-геологических условиях: в IV и V категориях устойчивости приконтурного массива выработки при действии в окружающих породах сжимающих гидростатических напряжений 24 (вне зоны влияния очистных работ) и 42 (в зоне влияния очистных работ) МПа. При этом границы применимости подхода охватывают диапазон ширин от 3 до 8 м, что соответствует всему спектру сечений подготовительно-нарезных выработок современных рудников.

Таблица 2 / Table 2

Расчет типов и параметров комбинированной крепи подготовительно-нарезных выработок / Design of composite support systems for development drifts

Ширина выработки, м / Drift width, m	**6,0**	**6,0**	**5,0**	**5,0**
Максимальные напряжения сжатия в приконтурном массиве, МПа / Maximum compressive stresses in the excavation near-field, MPa	28 (вне зоны влияния очистных работ / outside mining influence zone)	42 (в зоне влияния очистных работ / within mining influence zone)	24 (вне зоны влияния очистных работ / outside mining influence zone)	35 (в зоне влияния очистных работ / within mining influence zone)
Предел прочности пород в образце, МПа / Uniaxial compressive strength of intact rock, MPa	99	99	99	99
Категория устойчивости выработки / Stability class of the drift	IV	V	IV	V
Коэффициент структурного ослабления приконтурного массива / Damage factor for the near-field rock mass	0,15	0,1	0,15	0,1
Предел прочности приконтурного массива, МПа / Strength of the excavation-damaged zone, MPa	15	10	15	10
Этап 1: анкерование штангами / Stage 1: Rebar bolting				
Сетка анкерования, м / Bolt spacing, m	1,0 × 1,0	0,8 × 0,8	1,0 × 1,0	0,7 × 0,7
Длина анкера, м / Bolt length, m	2,4	2,4	2,4	2,4
Коэффициент упрочнения приконтурного массива / Confinement factor for the near-field rock mass	1,3	1,55	1,3	1,8
Предел прочности приконтурного массива после анкерования, МПа / Strength of the reinforced near-field rock mass, MPa	19,3	15,35	19,3	17,82
Категория устойчивости выработки после анкерования / Stability class after Bolting	IV	IV	IV	IV

Этап 2: анкерование канатами / Stage 2: Cable bolting				
Сетка канатного анкерования, м / Cable bolt spacing, m	1,2 × 1,2	1,0 × 1,0	1,2 × 1,2	1,0 × 1,0
Длина анкера, м / Bolt length, m	5	5	5	5
Коэффициент упрочнения приконтурного массива / Confinement factor for the near-field rock mass	1,7	1,9	1,7	1,9
Предел прочности массива после анкерования, МПа / Strength Limit of Rock Mass after Cable Bolting, MPa	32,82	29,16	32,82	33,86
Категория устойчивости массива после анкерования / Stability class after Cable Bolting	III	III	III	III
Нагрузка на крепь, МПа / Load on the Support, MPa	0,22	0,29	0,17	0,20
Этап 3: установка поддерживающей крепи / Stage 3: Installation of Additional Support				
Тип и параметры дополнительной поддерживающей крепи / Type and Parameters of Additional Support	Металлическая арочная СВП-22 с шагом 1,1 м / Steel arch support SVP-22 with 1.1 m spacing.	Металлическая арочная СВП-22 с шагом 0,8 м / Steel arch support SVP-22 with 0.8 m spacing.	Набрызг-бетон 220 мм + металлическая сетка 6 мм / Shotcrete 220 mm + steel mesh 6 mm	Набрызг-бетон 240 мм + металлическая сетка 12 мм / Shotcrete 240 mm + steel mesh 12 mm
Итоговая несущая способность комбинированной крепи, МПа / Final Load-Bearing Capacity of the Combined Support, MPa	0,264	0,348	0,2	0,24
Коэффициент запаса устойчивости/ Stability Safety Factor	1,2	1,2	1,2	1,2

Данная методика позволяет выполнять расчет параметров крепи для всех категорий устойчивости скального массива с учетом комбинированной работы крепи. Стоит отметить, что на данном этапе исследований у нее есть ряд ограничений. Максимальная длина канатных анкеров в используемой номограмме ограничена 5 метрами. Кроме того, при расчете несущей способности монолитной бетонной крепи необходимо учитывать коэффициент армирования, так как диаметр арматуры не ограничен лишь 6 и 12 мм, размерами ячейки сетки 100х100 мм и т.д. Также в расчетах использовались только прочностные характеристики бетона класса В25 как наиболее распространенного при креплении выработок. В дальнейших исследованиях по данной тематике представленные ограничения будут учтены и границы применимости данной методики будут расширены.

Выводы

1. Рассчитана несущая способность основных типов поддерживающих крепей подготовительно-нарезных выработок: набрызгбетонной, фибронабрызгбетонной и железобетонной (набрызгбетонной, армированной металлической сеткой), учитывающая параметры выработки и крепи.

2. Усовершенствована методика расчета параметров комбинированной (анкерная + набрызгбетонная + металлическая арочная) крепи подготовительно-нарезных выработок, предусматривающая соблюдение условия ее устойчивости, при котором несущая способность крепи больше или равна нагрузке со стороны массива с учетом коэффициента упрочнения.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение границ применимости методики и учёт дополнительных факторов.

Литература

1. Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Коптяков Д.А. Обоснование хрупкого режима разрушения низкопрочных сильнотрещиноватых массивов скальных горных пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 795–811.

2. Габараев О.З., Абдулхалимов А.Г., Келехсаев В.Б., Дзапаров В.Х. Методика расчета нагрузки на вновь возводимую крепь при реконструкции горных выработок // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – № 7. – С. 54–58. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-54-58.

3. Головин К.А., Копылов А.Б., Сушков С.Л., Сушков А.Д. К определению нагрузок на крепь горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 186–188. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-186-187.

4. Качурин Н.М., Соловьев Д.А., Соловьев Р.А., Стась П.П. Напряженно-деформированное состояние бетонной крепи сопряжений вертикального ствола с выработками околоствольного двора // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 528–537.

5. Корчак П.А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-5-0-85.

6. Масаев Ю.А., Масаев В.Ю. Анализ существующих методов расчета комбинированных крепей горных выработок // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 3. – С. 67–73.

7. Матаев А.К., Абеуов Е.А., Зейтинова Ш.Б., Шайке Н.К., Lozynskyi V. Исследование геомеханической ситуации в массиве горных пород в зоне влияния очистных работ в условиях шахты Хримтауского месторождения // Труды университета. – 2023. – № 3(92). – С. 220–231. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_220.

8. Муратбакеев Э.Х., Судариков А.Е. 3D моделирование крепления горных выработок // Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 241–246.

9. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Геофизический мониторинг разработки напряженно-деформированных рудовмещающих массивов // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 63–73. DOI: 10.46698/VNC.2021.57.57.005.

10. Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С. Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. – 2020. – № 6. – С. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08.

11. Плешко М.С., Лобанов Е.А., Волков Д.С., Муштекенов Т.С. Опыт проходки и крепления сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горный журнал. – 2022. – № 7. – С. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05.

12. Behnia D., Behnia M., Shahriar K., Goshtasbi K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 191. – pp. 591–599. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.222.

13. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming // Advances in Complex Systems. – 2002. – Vol. 5. No. 4. – pp. 389–408. DOI: 10.1142/S0219525902000626.

14. Dehghani H., Jodeiri Shokri B., Mohammadzadeh H., Shamsi R., Abbas Salimi N. Predicting and controlling the ground vibration using gene expression programming (GEP) and teaching–learning-based optimization (TLBO) algorithms // Environmental Earth Sciences. – 2021. – Vol. 80. No. 22. – pp. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-021-10052-7.

15. Monjezi M., Dehghani H., Shakeri J., Mehrdanesh A. Optimization of prediction of flyrock using linear multivariate regression (LMR) and gene expression programming (GEP) – Topal Novin mine, Iran // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14. No. 15. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-021-07772-2.

16. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2013. – No. 5. – pp. 325–329. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.006.

17. Shirani F.R., Salimi A., Monjezi M., Ebrahimabadi A., Moormann Ch. Roadheader performance prediction using genetic programming (GP) and gene expression programming (GEP) techniques // Environmental Earth Sciences. – 2017. – Vol. 76. No. 16. – pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12665-017-6920-2.

18. Zhang R., Xue X., Deng C. Investigation of motion characteristics of catastrophic landslide using material point method and gene expression programming // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2023. – Vol. 170. – pp. 105507. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105507.

References

1. Balek A.E., Kharisov T.F., Koptyakov D.A. Justification of the brittle mode of fracture in low-strength highly fractured rock massifs. Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth. 2024. No. 4. pp. 795–811. (In Russ.)

2. Gabaraev O.Z., Abdulkhalimov A.G., Kelekhsaev V.B., Dzaparov V.Kh. Procedure for calculation of load on newly erected support during reconstruction of mine workings. Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2020. No. 7. pp. 54–58. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-54-58. (In Russ.)

3. Golovin K.A., Kopylov A.B., Sushkov S.L., Sushkov A.D. On the determination of loads on mine support. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2024. No. 4. pp. 186–188. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-186-187. (In Russ.)

4. Kachurin N.M., Solovyov D.A., Solovyov R.A., Stas P.P. Stress-strain state of the concrete support at the intersections of a vertical shaft with the pit bottom station workings Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth. 2024. No. 1. pp. 528–537. (In Russ.)

5. Korchak P.A. Geomechanical prediction of the development of brittle fracture zones in the vicinity of mine working intersections in an overstressed rock mass. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2021. No. 5. pp. 85–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-5-0-85. (In Russ.)

6. Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Analysis of existing methods for calculating combined supports of mine workings. Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry. 2023. No. 3. pp. 67–73. (In Russ.)

7. Mataev A.K., Abeuov E.A., Zeitinova Sh.B., Shayke N.K., Lozynskyi V. Investigation of the geomechanical situation in the rock mass in the zone of influence of stoping operations under the conditions of the Khromtau deposit mine. University Proceedings. 2023. No. 3(92). pp. 220–231. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_220. (In Russ.)

8. Muratbakeev E.Kh., Sudarikov A.E. 3D modeling of mine support. In: Proceedings of the IV All-Russian Scientific Conference “Modern Educational Technologies in the Training of Specialists for the Mineral and Raw Material Complex”. Saint Petersburg. Saint Petersburg Mining University. 2021. pp. 241–246. (In Russ.)

9. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Geophysical monitoring of the development of stress-deformed ore massives. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 63–73. DOI: 10.46698/VNC.2021.57.57.005. (In Russ.)

10. Pleshko M.S., Davydov A.A., Silchenko Yu.A., Kaledin O.S. Effective solutions for supporting the super-deep SKS-1 shaft of the Skalisty mine in complex geomechanical conditions. Gornyi Zhurnal. 2020. No. 6. pp. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08. (In Russ.)

11. Pleshko M.S., Lobanov E.A., Volkov D.S., Mushtekov T.S. Experience in driving and supporting super-deep mine workings of the Skalisty mine, Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel. Gornyi Zhurnal. 2022. No. 7. pp. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05. (In Russ.)

12. Behnia D., Behnia M., Shahriar K., Goshtasbi K. A new predictive model for rock strength parameters utilizing GEP method. Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. pp. 591–599. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.222.

13. Candida F. Genetic representation and genetic neutrality in gene expression programming. Advances in Complex Systems. 2002. Vol. 5. No. 4. pp. 389–408. DOI: 10.1142/S0219525902000626.

14. Dehghani H., Jodeiri Shokri B., Mohammadzadeh H., Shamsi R., Abbas Salimi N. Predicting and controlling the ground vibration using gene expression programming (GEP) and teaching–learning-based optimization (TLBO) algorithms. Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80. No. 22. pp. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-021-10052-7.

15. Monjezi M., Dehghani H., Shakeri J., Mehrdanesh A. Optimization of prediction of flyrock using linear multivariate regression (LMR) and gene expression programming (GEP) – Topal Novin mine, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14. No. 15. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-021-07772-2.

16. Ozbek A., Unsal M., Dikec A. Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. No. 5. pp. 325–329. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.006.

17. Shirani F.R., Salimi A., Monjezi M., Ebrahimabadi A., Moormann Ch. Roadheader performance prediction using genetic programming (GP) and gene expression programming (GEP) techniques. Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. No. 16. pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12665-017-6920-2.

18. Zhang R., Xue X., Deng C. Investigation of motion characteristics of catastrophic landslide using material point method and gene expression programming. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023. Vol. 170. pp. 105507. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105507.