Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Эффективное крепление подземных горных выработок как фактор снижения последствий геодинамических явлений

А.И. Конурин ✉
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
✉ konurin@misd.ru

Резюме: В статье представлена сравнительная оценка систем крепления подземных горных выработок в удароопасных и высоконапряженных условиях методом конечных элементов. Актуальность работы обусловлена тем, что при динамических проявлениях горного давления отказ выработки определяется не только прочностью отдельных элементов, но и работоспособностью системы «массив – крепь – удержание поверхности» в целом. Цель исследования – сопоставить пять вариантов крепления по единой расчетной схеме при одинаковых исходных условиях. Использована пространственная конечно-элементная модель арочной выработки с учетом упругопластического поведения массива по критерию Мора–Кулона, исходного напряженного состояния и трех расчетных сценариев: базового высоконапряженного состояния, ослабленной приконтурной зоны и эквивалентного динамического воздействия. Сопоставление выполнено по смещениям кровли и бортов, объему пластической зоны, напряжениям в элементах крепи, протяженности зоны нарушения сцепления и интегральному показателю эффективности. Установлено, что комбинированная система с энергопоглощающими анкерами и фиброармированным торкретбетоном обеспечивает наибольшее снижение смещений и поврежденности приконтурного массива. Базовая система без специальных энергопоглощающих элементов показала наибольшую чувствительность к ослаблению приконтурной зоны и импульсному воздействию. Практическая значимость работы заключается в возможности использовать предложенную расчетную схему при предварительном выборе крепи для выработок в удароопасных массивах и при постановке детальных проектных расчетов. Научная новизна состоит в сопоставлении пяти систем крепления по единому набору количественных критериев в рамках одной расчетной постановки.

Ключевые слова: горный удар, подземная выработка, система крепления, энергопоглощающая крепь, анкерная крепь, торкретбетон, численное моделирование, метод конечных элементов, устойчивость выработок

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №25-27-00034.

Для цитирования: Конурин А.И. Эффективное крепление подземных горных выработок как фактор снижения последствий геодинамических явлений. *Горная промышленность.* 2026;(5):135–141. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Efficient underground mine support as a factor in reducing consequences of rock bursts

A.I. Konurin ✉
Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
✉ konurin@misd.ru

Abstract: The paper presents a finite element study aimed at a comparative assessment of support systems for underground excavations in burst-prone and highly stressed rock masses. The problem is relevant because failure of an underground opening under dynamic ground pressure is controlled not only by the strength of individual support elements, but also by the performance of the entire rock mass-support-surface retention system. The purpose of the study is to compare five support designs within a unified numerical framework under identical initial conditions. A three-dimensional finite element model of an arched excavation was used. The rock mass was described using an elastoplastic Mohr-Coulomb model, and three calculation scenarios were considered, i.e. the base high-stress state, a weakened near-contour zone, and an equivalent dynamic loading case. The support designs were compared by the roof and wall displacements, plastic zone size, stresses in the support elements, contact degradation length, and an integral efficiency index. The results show that the combined system consisting of energy-absorbing bolts and fibre-reinforced shotcrete provides the greatest reduction in displacements and damage of the surrounding rock mass. The base support system without special energy-absorbing elements is the most sensitive to weakening of the border zone and impulse loading. The proposed approach can be used for preliminary selection of support in burst-prone excavations and for execution of detailed design calculations. The novelty of the study lies in comparing five support systems using a unified set of quantitative criteria within one numerical model.

Keywords: rock burst, underground excavation, support system, energy-absorbing support, rock bolts, shotcrete, numerical modeling, finite element method, excavation stability

Acknowledgements: The study was supported by grant No.25-27-00034 of the Russian Science Foundation.

For citation: Konurin A.I. Efficient underground mine support as a factor in reducing consequences of rock bursts. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):135–141. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-135-141

Введение

Освоение глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых сопровождается усложнением геомеханической обстановки, ростом действующих напряжений и повышением вероятности динамических проявлений горного давления. В этих условиях устойчивость подземных выработок определяется способностью системы крепления ограничивать разрушение приконтурного массива, удерживать нарушенную породу и снижать последствия горного удара.

Для удароопасных и высоконапряженных условий недостаточно оценивать только статическую несущую способность отдельных элементов крепи [1; 2]. В современной литературе развивается системный подход, при котором объектом проектирования является совокупность элементов «массив – крепь – удержание поверхности», а критериями эффективности служат прочность, деформируемость, энергоемкость и совместная работа элементов [3; 4].

Поведение энергопоглощающих анкеров, в том числе конусных анкеров и анкеров типа D-Bolt, предназначенных для работы при больших перемещениях и импульсном нагружении, рассмотрено в работах [5–7]. Методические вопросы динамических испытаний и сопоставления систем крепления освещены в работах [8; 9]. В отечественной литературе подходы к геомеханическому обоснованию работ в удароопасных условиях и выбору анкерной или податливой крепи представлены в работах [10–12], а применение расчетных комплексов для обоснования параметров крепления показано в работах [13; 14].

Объектом исследования является система крепления подземной горной выработки в удароопасном или высоконапряженном массиве. Предметом исследования является влияние конструктивного типа крепления на напряженно-деформированное состояние приконтурной зоны и работоспособность выработки при различных расчетных сценариях.

Целью работы является сравнительная оценка вариантов крепления подземной выработки методом конечных элементов по единой системе показателей. Рабочая гипотеза заключается в том, что комбинированные и податливые системы крепления обеспечивают большее снижение смещений контура и объема пластической зоны по сравнению с базовой системой при одинаковых исходных условиях.

Для достижения поставленной цели сформирована единая расчетная постановка, заданы пять вариантов крепления В1–В5, рассмотрены три сценария нагружения и ослабления приконтурной зоны, выполнено сопоставление вариантов по количественным критериям и дана инженерная интерпретация области их рационального применения.

Материалы и методы

Численное исследование выполнено в программном комплексе ANSYS. Расчетная схема включает два последовательных этапа: статический расчет и нестационарный расчет динамического отклика. На первом этапе формировалось исходное напряженно-деформированное состояние массива и выработки с установленной крепью. На втором этапе к той же модели прикладывалось эквивалентное динамическое воздействие в виде кратковременного импульса нагрузки. Для массива принята упругопластическая модель Мора–Кулона; для нарушенных участков при необходимости может быть использована модель трещиноватого массива (Jointed Rock). Для контактов «анкер – раствор» и «раствор – порода» применена модель когезионной зоны разрушения, реализованная через контактные пары с возможностью отрыва. Такой подход позволяет учитывать начальную жесткую связь, достижение пикового сцепления, постпиковое разупрочнение и развитие зоны нарушения сцепления. Анкеры моделировались как стержневые элементы, элементы поверхностного удержания – как оболочечные элементы для сетки и слоя торкретбетона. Параметры контакта задавались по билинейному закону «напряжение – относительное смещение» с последующим снижением жесткости и прочности после достижения предельного состояния, что соответствует современным представлениям о работе полностью закрепленных анкеров [15].

В качестве типизированного объекта для постановки расчетов приняты глубокие горизонты Таштагольского месторождения. По опубликованным данным в не тронутом очистными работами массиве глубоких горизонтов действуют повышенные горизонтальные напряжения, а максимальное главное горизонтальное напряжение может достигать 2,8–3,0γH при вертикальной составляющей, близкой к весу налегающих пород [16]. В работе принят базовый расчетный уровень, соответствующий горизонту –350 м и глубине порядка H = 890 м. Для модельного эксперимента принято арочное сечение выработки шириной B = 4,5 м и высотой h = 4,0 м. Плотность массива принята равной 2,8 т/м^3, что соответствует удельному весу $\gamma \approx 27{,}5$ кН/м^3; при таких условиях исходное вертикальное напряжение составляет $\sigma_v \approx 24{,}5$ МПа. Длина закрепленного расчетного фрагмента по оси выработки принята равной 6,3 м, что обеспечивает размещение девяти рядов крепления при шаге 0,7 м. Сопоставление вариантов выполняется по среднему ряду анкеров. Модуль деформации массива принят равным 70 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,25.

В качестве сравниваемых решений приняты пять вариантов крепления, отражающих распространенные и перспективные инженерные подходы для удароопасных условий [11–13]. В1 используется как базовая система без специальных энергопоглощающих элементов. В2 и В3 проверяют влияние податливости анкеров и совместной работы армирования с поверхностным удержанием при импульсном воздействии [5–9; 17; 18]. В4 характеризует повышение надежности контакта «анкер – раствор – порода» за счет улучшенного анкерующего состава [19; 20]. В5 представляет специализированное решение для нарушенных, коррозионно-активных или комбинированно нагруженных зон [21–26]. Во всех вариантах геометрия расчетной

Таблица 1
Варианты крепи, принятые для сравнительного моделирования

Table 1
Support designs used in the comparative modeling

Вариант	Анкерное армирование	Поверхностное удержание	Контакт «анкер – раствор –порода»	Расчетный смысл варианта
B1	Стальные стержневые анкеры: L = 2,4 м; d = 22 мм; шаг по контуру и по оси выработки 0,7 м; E = 200 ГПа; предел текучести 500 МПа	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Базовые значения K_n, K_t, Tmax, τmax, G_c	Базовая система для сравнения
B2	Энергопоглощающие стальные анкеры с геометрией B1; E = 200 ГПа; предельное перемещение 150–220 мм; энергоемкость 25–60 кДж на анкер	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Как в B1	Вклад податливых анкеров при импульсном воздействии
B3	Энергопоглощающие анкеры как в B2	Фиброармированный торкретбетон h = 50 мм; E = 30 ГПа; повышенная остаточная прочность оболочечного слоя	Как в B1	Совместный эффект податливых анкеров и усиленного поверхностного удержания
B4	Стальные стержневые анкеры как в B1	Обычный торкретбетон h = 50 мм; E = 25 ГПа	Улучшенный анкерующий состав: K_n и K_t +20 %, T_{max} и τ_{max} +25 %, G_c +25 % относительно B1	Влияние качества анкерования и устойчивости контактной зоны
B5	Стеклопластиковые анкеры: L = 2,4 м; d = 22 мм; шаг 0,7 м; E = 45 ГПа; расчетная прочность на растяжение 600 МПа	Как в B3	Как в B1	Специализированное решение для нарушенных и коррозионно-активных зон

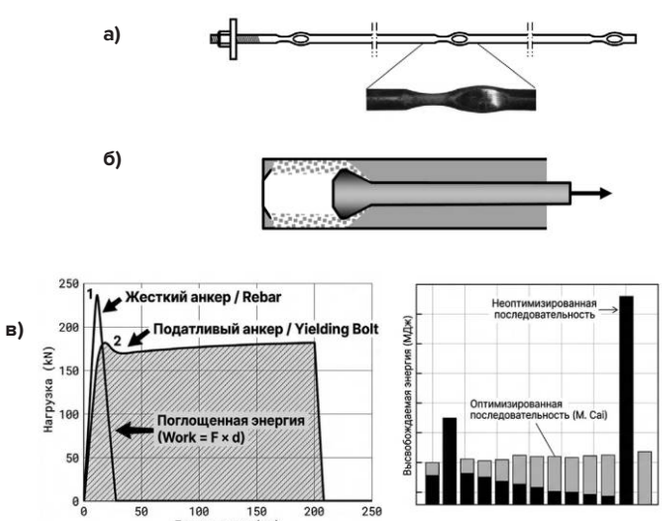


Рис. 1
Энергопоглощающие элементы: а – анкер типа D-Bolt; б – конусный анкер; в – принцип действия

Fig. 1
Energy absorbing elements: а – D-Bolt rock bolt; б – cone bolt; в – operating principle

области, характеристики массива и граничные условия остаются одинаковыми; изменяются только параметры системы крепления. Основные характеристики вариантов приведены в табл. 1, примеры специальных энергопоглощающих элементов – на рис. 1.

Для проверки устойчивости вариантов крепления использованы три расчетных сценария. Сценарий C1 соответствует базовому высоконапряженному состоянию массива с вертикальным напряжением $\sigma_v \approx 24{,}5$ МПа и соотношением главных напряжений $\sigma_1{:}\sigma_2{:}\sigma_3 \approx 2{,}5{:}1{,}3{:}1$. Сценарий C2 вводит ослабленную приконтурную зону толщиной 0,5 м со снижением c, φ и E на 30%, что позволяет оценить чувствительность систем крепления к нарушенной зоне у контура выработки. Сценарий C3 моделирует эквивалентное динамическое воздействие в виде кратковременного полусинусоидального импульса, задаваемого как дополнительное нормальное давление на контур выработки по закону $p(t) = p_0 \cdot \sin(\pi t/T)$ при $0 \le t \le T$ и $p(t) = 0$ при $t > T$. Приняты амплитуда импульса p0 = 5 МПа, длительность T = 0,02 с, общее время переходного расчета 0,05 с, начальный шаг по времени $1{\cdot}10^{-4}$ с, максимальный шаг $5{\cdot}10^{-4}$ с и коэффициент демпфирования 0,05. Во всех сценариях сохраняются одинаковыми геометрия модели и характеристики вариантов крепи.

Сопоставление вариантов B1–B5 выполняется по набору количественных показателей, отражающих реакцию массива и работу элементов крепи. В качестве основных выходных параметров приняты: максимальное смещение кровли uк, мм; сближение бортов uб, мм; объем пластической зоны $V_{пл}$, м^3; максимальное напряжение в анкерах $\sigma_{анк}$, МПа; протяженность зоны нарушения сцепления $L_{отс}$, м, характеризующая устойчивость контакта «анкер – раствор – порода».

Для сводного ранжирования вариантов используется безразмерный интегральный показатель эффективности $I_{эфф}$:

$$I_{эфф} = w_1\Delta^* + w_2P^* + w_3\Sigma^* + w_4D^*,$$

где Δ* – нормированный показатель деформативности контура; P* – нормированный показатель поврежденности приконтурного массива; Σ* – нормированный показатель загрузки элементов крепи; D^* – нормированный показатель нарушения сцепления в системе «анкер – раствор – порода».

В настоящем модельном эксперименте при отсутствии априорно обоснованного приоритета между критериями приняты равные веса:

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0.25.$$

Нормированные составляющие определяются по формулам:

$$\Delta^* = \frac{\left(\frac{u_k}{u_{k,\max}} + \frac{u_b}{u_{b,\max}} + \frac{u_p}{u_{p,\max}}\right)}{m};$$

$$P^* = \frac{V_{pl}}{V_{pl,\max}};$$

$$\Sigma^* = \frac{\sigma_{ank}}{\sigma_{ank,\max}};$$

$$D^* = \frac{L_{отс}}{L_{отс,\max}}.$$

Все максимальные значения в знаменателе обозначены индексом max и принимаются в пределах одного и того же расчетного сценария С1, С2 или С3, что обеспечивает корректное сопоставление вариантов В1–В5 при одинаковых внешних условиях. Чем меньше значение $I_{эфф}$, тем выше интегральная эффективность системы крепления. Показатель $I_{эфф}$ является вспомогательным критерием второго уровня: основные инженерные выводы должны подтверждаться прямыми расчетными параметрами, а интегральный показатель используется для компактного ранжирования вариантов в сводных диаграммах и таблице результатов.

Результаты

На первом этапе получены результаты расчета для сценария С1, используемого в качестве базового для последующего сопоставления вариантов В1–В5. Расчетная схема модели и характерное распределение напряжений вокруг закрепленной выработки приведены на рис. 2. В базовом состоянии наибольшая концентрация напряжений формируется в приконтурной зоне кровли и бортов, а развитие пластических деформаций зависит от исходного поля напряжений, жесткости крепи и способности поверхностного удержания ограничивать раскрытие нарушений.

В базовом сценарии С1 переход от системы В1 к системам с повышенной податливостью и поверхностным удержанием приводит к снижению деформаций и повреженности приконтурного массива. Для варианта В1 максимальное смещение кровли составляет 22,4 мм, сближение бортов – 18,7 мм, объем пластической зоны – 6,40 м³. Этот вариант принят в качестве эталонного уровня для сопоставления остальных систем крепления. Сравнительные диаграммы абсолютных значений основных показателей приведены на рис. 3.

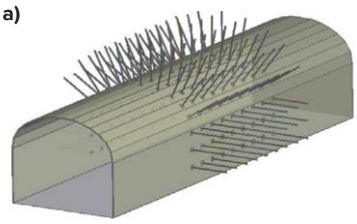
Наиболее выраженный эффект в сценарии С1 получен для комбинированной системы В3: по сравнению с В1 смещение кровли уменьшается на 34,8%, сближение бортов – на 35,3%, объем пластической зоны – на 39,8%, а протяженность зоны нарушения сцепления – на 41,3%. Вариант В4 уступает В3 по величине смещений, но обеспечивает минимальную длину зоны нарушения сцепления $L_{отс}$ = 0,62 м, что подтверждает его преимущество при необходимости повысить надежность контакта «анкер – раствор – порода». Вариант В5 снижает максимальные напряжения в анкерах до 301 МПа, однако по деформационным показателям остается ближе к базовой системе; поэтому его следует рассматривать как специализированное, а не универсально оптимальное решение, из-за низкой прочности таких анкеров на срез.

Сценарий С2 характеризует работу систем крепления при наличии ослабленной приконтурной зоны толщиной 0,5 м. Ухудшение свойств приконтурного массива приводит к росту деформаций по всем вариантам: для базовой системы В1 смещение кровли возрастает до 31,8 мм, сближение бортов – до 26,9 мм, объем пластической зоны – до 9,95 м³, а протяженность зоны нарушения сцепления – до 1,78 м. Относительное изменение ключевых показателей и интегральный показатель эффективности приведены на рис. 4.

Наилучшее интегральное значение в сценарии С2 сохраняет вариант В3 ($I_{эфф}$ = 0,638), что связано с совместной работой энергопоглощающих анкеров и фиброармированного торкретбетона. По сравнению с В1 этот вариант снижает смещение кровли на 39,0%, сближение бортов – на 37,9%, объем пластической зоны – на 41,1%. Вариант В4 имеет близкую интегральную оценку ($I_{эфф}$ = 0,660) и демонстрирует минимальную протяженность зоны нарушения сцепления – 0,78 м; поэтому он рационален в условиях, где главным ограничивающим фактором является устойчивость контактной зоны, а не только общая деформируемость контура.

Сценарий С3 отражает действие кратковременного эквивалентного динамического импульса и является наиболее показательным для оценки работоспособности крепи в удароопасных условиях. В базовом варианте В1 отмечается максимальный рост деформаций: смещение кровли

а)



б)

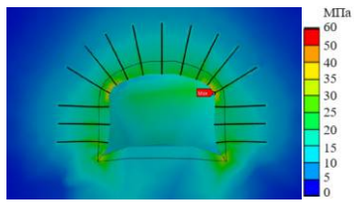
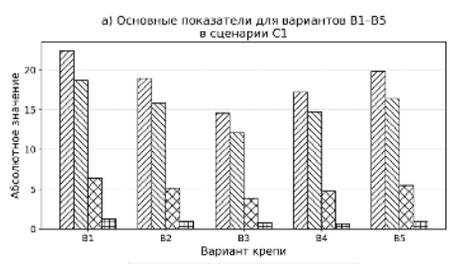


Рис. 2
Геометрическая модель закрепленной выработки (а) и базовое распределение напряжений вокруг выработки (б)

Fig. 2
Calculation scheme of the model (a) and initial stress distribution around the excavation (б)

а)



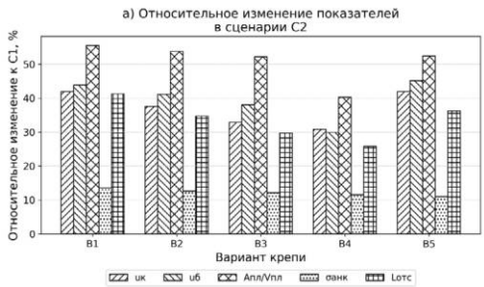
б)



Рис. 3
Сравнительные диаграммы абсолютных значений основных показателей (а) и напряжений в анкерах (б) для вариантов В1–В5 в базовом сценарии С1

Fig. 3
Comparative charts of absolute values of the key indicators (a) and stresses in rock bolts (б) for the V1–V5 support designs in the C1 base scenario

а)



б)

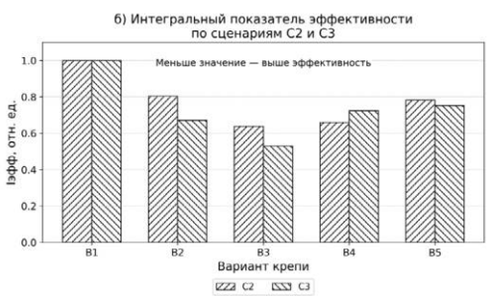


Рис. 4
Относительное изменение ключевых показателей по сценарию С2 (а) и интегральный показатель эффективности для вариантов В1–В5 по сценариям С2 и С3 (б)

Fig. 4
Relative changes in key indicators for the C2 scenario (a) and integral efficiency index for the V1–V5 support designs under the C2 and C3 scenarios (б)

достигает 35,4 мм, сближение бортов – 29,6 мм, объем пластической зоны – 10,84 м^3, а длина зоны нарушения сцепления – 2,05 м. Эти значения подтверждают недостаточность жесткой базовой системы при импульсном нагружении.

Наиболее устойчивую реакцию на динамическое воздействие демонстрирует вариант В3: относительно В1 смещение кровли уменьшается на 49,7%, сближение бортов – на 49,0%, объем пластической зоны – на 52,8%, напряжения в анкерах – на 28,7%, а зона нарушения сцепления – на 57,1%. Вариант В2 также заметно эффективнее базовой системы (Iэфф = 0,670) благодаря податливой работе анкеров, однако отсутствие усиленного слоя торкретбетона ограничивает его способность сдерживать развитие пластической зоны. Варианты В4 и В5 в динамическом сценарии уступают В2 и В3 по деформационным критериям, что указывает на решающую роль согласованной работы армирования с поверхностным удержанием. Сводные количественные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2
Сводные количественные результаты моделирования

Table 2
Summary quantitative results of the numerical modeling

Сценарий	Вариант крепи	$u_к$, мм	$u_б$, мм	$V_{пл}$, м^3	$\sigma_{анк}$, МПа	$L_{отс}$, м	$I_{эфф}$
С1	В1	22,4	18,7	6,40	412	1,26	1,000
С1	В2	18,9	15,8	5,15	356	0,98	0,823
С1	В3	14,6	12,1	3,85	338	0,74	0,665
С1	В4	17,2	14,7	4,72	347	0,62	0,712
С1	В5	19,8	16,4	5,48	301	0,91	0,797
С2	В1	31,8	26,9	9,95	468	1,78	1,000
С2	В2	26,0	22,3	7,92	401	1,32	0,804
С2	В3	19,4	16,7	5,86	379	0,96	0,638
С2	В4	22,5	19,1	6,62	387	0,78	0,660
С2	В5	28,1	23,8	8,35	334	1,24	0,783
С3	В1	35,4	29,6	10,84	492	2,05	1,000
С3	В2	24,1	20,4	7,18	372	1,18	0,670
С3	В3	17,8	15,1	5,12	351	0,88	0,530
С3	В4	27,9	23,5	8,24	431	0,96	0,724
С3	В5	29,8	25,0	8,97	318	1,42	0,752

Обсуждение результатов

Расчетная оценка показывает, что эффективность крепи в удароопасных условиях определяется не максимальной прочностью одного элемента, а согласованной работой системы «массив – анкерное армирование – удержание поверхности – контактная зона». Во всех трех сценариях наилучшее интегральное ранжирование получает вариант В3, сочетающий энергопоглощающие анкеры и фиброармированный торкретбетон. Такой результат согласуется с представлениями о необходимости перехода от чисто прочностной логики к оценке деформативности, энергоемкости и остаточной работоспособности системы крепления.

Преимущество В3 связано с взаимодополняющей работой элементов. Энергопоглощающие анкеры воспринимают часть импульсной энергии и допускают контролируемые перемещения без немедленной потери несущей способности; армированный фиброволокном торкретбетон ограничивает раскрытие приконтурных нарушений и удерживает фрагментированный массив; повышенная жесткость поверхностного удержания уменьшает развитие пластической зоны. Поэтому В3 дает не только меньшие смещения, но и более благоприятное перераспределение напряжений между массивом и крепью.

Базовый вариант В1 во всех сценариях сохраняет наибольшие значения смещений, поврежденности и зоны нарушения сцепления. Вариант В2 эффективен при динамическом воздействии, но уступает В3 из-за менее развитого поверхностного удержания. Вариант В4 показывает преимущество по устойчивости контакта, особенно в сценарии С2, однако не обеспечивает максимального снижения смещений. Вариант В5 снижает напряжения в анкерах за счет меньшего модуля упругости, но при принятой расчетной постановке не является оптимальным по общесистемной устойчивости; его рационально рассматривать для коррозионно-активных, нарушенных или специальных условий эксплуатации. Следовательно, ранжирование вариантов можно представить следующим образом: В3 – наиболее эффективная система по совокупности критериев; В2 – рациональная динамически податливая система; В4 – вариант для условий, где критична надежность анкерующего состава и контактной зоны; В5 – специализированное решение; В1 – базовый вариант, недостаточный для наиболее неблагоприятных удароопасных условий.

Результаты работы носят сравнительный характер и справедливы для принятой пространственной расчетной постановки. При интерпретации результатов необходимо учитывать ограничения, связанные со способом задания эквивалентного динамического воздействия, идеализацией массива и упрощенным описанием контакта «анкер – раствор – порода». В статье не рассматриваются явно заданная природная трещиноватость, долговременная деградация свойств материалов, влияние подземных вод и изменение параметров крепи во времени. Эти факторы должны быть учтены на

следующем этапе исследования или при переходе к детальному проектному моделированию.

Полученные зависимости и сравнительные оценки могут быть использованы при предварительном выборе системы крепления для подземных выработок в удароопасных и высоконапряженных массивах, а также при постановке детальных проектных расчетов. Результаты могут служить основанием для уточнения программы шахтных наблюдений и выбора вариантов крепи для последующей натурной проверки.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с уточнением параметров контакта «анкер – раствор – порода» по данным лабораторных или шахтных испытаний, а также с расширением расчетной схемы на случаи выраженной трещиноватости, тектонической нарушенности и неоднородного напряженного состояния массива. Отдельный интерес представляет переход к более детальному динамическому расчету и натурной калибровке модели по данным инструментальных наблюдений в выработках.

Заключение

В работе выполнена сравнительная оценка пяти вариантов крепления подземной выработки в удароопасных условиях методом конечных элементов. Показано, что для инженерного выбора рациональной системы крепления необходимо оценивать не отдельный элемент, а систему «массив – крепь – удержание поверхности» по совокупности количественных критериев: смещениям кровли и бортов, объему пластической зоны, напряжениям в элементах крепи, протяженности зоны нарушения сцепления и интегральному показателю эффективности.

Наиболее эффективным по совокупности критериев является вариант B3, включающий энергопоглощающие анкеры и фиброармированный торкретбетон. В базовом сценарии он снижает смещение кровли и сближение бортов более чем на треть по сравнению с вариантом B1, а в динамическом сценарии C3 обеспечивает почти двукратное уменьшение основных показателей деформирования и поврежденности. Вариант B2 рационален при необходимости повысить податливость крепи при импульсном нагружении; вариант B4 целесообразен при повышенных требованиях к надежности контакта «анкер – раствор – порода»; вариант B5 следует рассматривать как специализированное решение для нарушенных и одновременно коррозионно-активных зон.

Список литературы / References

1. Cai M. Principles of rock support in burst-prone ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;36:46–56. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.003
2. Morissette P., Hadjigeorgiou J. Ground support design for dynamic loading conditions: A quantitative data-driven approach based on rockburst case studies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):909–919. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.03.002
3. Li C.C., Stjern G., Myrvang A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014;6(4):315–327. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.12.008
4. Sharifzadeh M., Lou J., Crompton B. Dynamic performance of energy-absorbing rockbolts based on laboratory test results. Part I: Evolution, deformation mechanisms, dynamic performance and classification. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020;105:103510. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103510
5. Li C.C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010;47(3):396–404. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.01.005
6. Li C.C. Performance of D-bolts under static loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45(2):183–192. https://doi.org/10.1007/s00603-011-0198-6
7. Li C.C., Doucet C. Performance of D-Bolts under dynamic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45(2):193–204. https://doi.org/10.1007/s00603-011-0202-1
8. Shirzadegan S., Nordlund E., Zhang P. Large scale dynamic testing of rock support system at Kiirunavaara underground mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(7):2773–2794. https://doi.org/10.1007/s00603-016-0939-7
9. Li C.C., Hadjigeorgiou J., Mikula P., Knox G., Darlington B., Royer R. et al. Performance of identical rockbolts tested on four dynamic testing rigs employing the direct impact method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(4):745–754. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.003
10. Семенова И.Э., Аветисян И.М. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях. *Горный журнал*. 2022;(1):28–33. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05
Semenova I.E., Avetisyan I.M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(1):28–33. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.05
11. Еременко В.А., Лушников В.Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):5–12. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-5-12
Eremenko V.A., Lushnikov V.N. Procedure for selecting dynamic ground support for rockbursting mining conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):5–12. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-5-12
12. Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П., Косырева М.А. Выбор анкерной крепи для выработок, пройденных в шахтах, склонных к горным ударам. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(3):86–95. Режим доступа: https://www.sibran.ru/upload/iblock/43d/43dcd4f95575c7a675b718804254904e.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Louchnikov V.N., Eremenko V.A., Sandy M.P., Kosyreva M.A. Support design for mines exposed to rockburst hazard. *Journal of Mining Science*. 2017;53(3):504–512. https://doi.org/10.1134/S1062739117032439

13. Бушков В.К., Шеметов Р.С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):40–54. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54
Bushkov V.K., Shemetov R.S. Stability estimation and justification of support systems in transition to underground mining in the Olimpiada deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):40–54. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54

14. Косырева М.А., Еременко В.А., Горбунова Н.Н., Терешин А.А. Расчет параметров крепи выработок с использованием программы Unwedge на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):57–64. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64
Kosyreva M.A., Eremenko V.A., Gorbunova N.N., Tereshin A.A. Support design using unwedge software for mines of Nornickel's polar division. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):57–64. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-57-64

15. Kong C., Xiao M., Yuan Q., Zhan S. A numerical model for fully grouted rock bolts considering the nonlinearities of the bolt and the bolt-grout interface. *Computers and Geotechnics*. 2023;160:105522. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105522

16. Еременко А.А., Конурин А.И., Христолюбов Е.А., Штирц В.А. Определение напряжений в массиве горных пород в районе подготовительных и нарезных выработок на удароопасных железорудных месторождениях. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных нау*к. 2020;7(1):57–63. https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070109
Eremenko A.A., Konurin A.I., Khristolyubov E.A., Shtirts V.A. Determination of stresses in the rock mass in the area of preparatory and access workings in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Journal of Fundamental and Applied Mining Science*. 2020;7(1):57–63. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070109

17. Saw H., Villaescusa E., Windsor C.R., Thompson A.G. Laboratory testing of steel fibre reinforced shotcrete. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013;57:167–171. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.08.008

18. Kim H.J., Li K., Akdag S., Zhang C., Oh J., Jiang P. et al. Thin spray-on liners (TSLs) as surface support in underground mining: A review. *Construction and Building Materials*. 2025;470:140432. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140432

19. Li Y., Ahmed A., Li D. Mechanical behaviour of fiber-reinforced grout in rock bolt reinforcement. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024;16(2):437–453. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.016

20. Liu H.-L., Li X.-A., Wang L.-C., Li L.-P., Zhou Z.-Q., Liu Z.-Q., Gong L. Study on the anchoring properties of new water glass-modified alkali-activated portland cement materials. *Construction and Building Materials*. 2024;450:138628. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138628

21. Li X., Aziz N., Mirzaghorbanali A., Nemcik J. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(7):2723–2735. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0907-7

22. Gregor P., Mirzaghorbanali A., McDougall K., Aziz N., Jodeiri B. Shear behaviour of fibreglass rock bolts for various pretension loads. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(11):8083–8113. https://doi.org/10.1007/s00603-023-03474-1

23. Ma H., Bai X., Han J., Hao Z., Yan N., Dong X. Experimental study on the mechanical properties of GFRP bolts: Insights from failure modes and adhesion strength of the rod-grout interface. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;23:e05103. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05103

24. Неугомонов С.С., Волков П.В., Жирнов А.А. Крепление слабоустойчивых пород усиленной комбинированной крепью на основе фрикционных анкеров типа СЗА. *Горный журнал*. 2018;(2):31–34. https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.04
Neugomonov S.S., Volkov P.V., Zhirnov A.A. Tunnel support in weak rocks using self-fastening rock bolts SZA. Gornyi Zhurnal. 2018;(2):31–34. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.04

25. Wang B., Guo X., Jin H., Li F., Song Y. Experimental study on degradation behaviors of rock bolt under the coupled effect of stress and corrosion. *Construction and Building Materials*. 2019;214:37–48. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.335

26. Hu Y., Zheng M., Feng W., Tong J., Wang Y., Wang Q. et al. Interface bond degradation and damage characteristics of full-length grouted rock bolt in tunnels with high temperature. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(10):2639–2657. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.04.018

Информация об авторе
Конурин Антон Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3373-2382; e-mail: konurin@misd.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 30.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 08.07.2026

Information about the author
Anton I. Konurin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3373-2382; e-mail: konurin@misd.ru

Article info
Received: 30.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 08.07.2026