

Оптимизация соотношения размеров ограждающих крепежных конструкций для охраны выемочных выработок

В. А. Канин, Ю. А. Пивень, Б. В. Хохлов[✉], А. В. Антипенко

ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская Федерация

✉ hbv@bk.ru

Резюме. Приведены результаты исследований, посвященных решению научно-технической проблемы охраны пластовых выемочных выработок, обслуживающих очистные забои с высокой нагрузкой в условиях неустойчивых вмещающих пород. Установлено, что с увеличением глубины горных работ существенно сокращается число забоев с устойчивой кровлей. Определено, что эффективность охраны выемочных выработок в условиях неустойчивых пород в значительной степени зависит от особенностей напряженно-деформированного состояния массива и характера его взаимодействия с поддерживающими опорами. Показано, что формирование областей предельного состояния вокруг выемочных выработок обусловлено совокупным влиянием прочностных свойств вмещающих пород и параметров применяемых средств охраны. Выявлено, что поведение поддерживающих опор в условиях предельного деформирования носит закономерный характер и определяется соотношением их жесткости и прочности массива. Выяснено, что при различных сочетаниях прочности поддерживающих опор и вмещающих пород формируются отличающиеся по конфигурации и масштабам зоны разрушений. Проведена оценка условий деформирования поддерживающих опор и развития разрушений в окружающих породах. Представлены закономерности формирования зон разрушений вокруг пластовой выемочной выработки. Результаты исследований могут быть полезными при обосновании параметров и выборе средств охраны пластовых выемочных выработок в условиях неустойчивых вмещающих пород, а также при разработке мероприятий по повышению устойчивости горных выработок при подземной разработке угля.

Ключевые слова: горное давление, выемочная выработка, крепление горных выработок, литые полосы из быстротвердеющих смесей

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования проведены в рамках выполнения фундаментальной научно-исследовательской работы FRSR-2026-0007 «Развитие теоретических основ формирования и эволюции техногенно-экологических рисков горнопромышленных регионов».

Для цитирования: Канин В.А., Пивень Ю.А., Хохлов Б.В., Антипенко А.В. Оптимизация соотношения размеров ограждающих крепежных конструкций для охраны выемочных выработок. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026;26(1):13-19. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-13-19>.

Optimization of dimension ratios of supporting enclosing structures for the protection of mining excavations

V. A. Kanin, Yu. A. Piven, B. V. Khokhlov[✉], A. V. Antypenko

Federal State Budgetary Scientific Institution "Republican Academic Scientific, Research and Design Institute for Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying", Donetsk, Russian Federation

✉ hbv@bk.ru

Rezume. The article presents the results of studies aimed at solving the scientific and technical problem of protecting seam extraction roadways servicing high-load longwall faces under conditions of unstable surrounding rocks. It has been established that with increasing mining depth, the number of faces with a stable roof decrease significantly. It has been determined that the effectiveness of roadway protection under unstable rock conditions largely depends on the characteristics of the stress-strain state of the rock mass and the nature of its interaction with supporting structures. It is shown that the formation of zones of ultimate (limit) state around extraction roadways is determined by the combined influence of the strength properties of the surrounding rocks and the parameters of the applied support systems. It has been revealed that the behavior of supporting structures under ultimate deformation conditions follows a regular pattern and is governed by the ratio between their stiffness and the strength of the rock mass. It has been found that

different combinations of the strength of supporting structures and surrounding rocks lead to the formation of failure zones that differ in configuration and scale. An assessment of the conditions of deformation of supporting structures and the development of failure in the surrounding rocks has been carried out. The regularities of the formation of failure zones around seam extraction roadways are presented. The research results may be useful for substantiating parameters and selecting support systems for seam extraction roadways in unstable surrounding rocks, as well as for developing measures to improve roadway stability in underground coal mining.

Keywords: rock pressure, mining excavation, mine support, cast strips made of fast-setting mixtures

Acknowledgments, funding, financial Support: The research was conducted as part of the fundamental scientific research project FRSR-2026-0007, "Development of the theoretical foundations for the formation and evolution of technogenic and environmental risks in mining regions".

For citation: Kanin V.A., Piven Yu A., Khokhlov B.V., Antypenko A.V. Optimization of dimension ratios of supporting enclosing structures for the protection of mining excavations. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026;26(1):13-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-13-19>.

Введение

Новая редакция программы развития угольной промышленности России до 2035 года разработана в соответствии с поручениями президента Российской Федерации и Правительства Российской Федерации и утверждена распоряжением Правительства РФ от 13 июня 2020 года № 1582-р.

Программа определяет цель, задачи и мероприятия государственной политики в угольной отрасли на период до 2035 года. Она актуализирует ранее действовавшую программу до 2030 года с учетом изменений рыночной конъюнктуры спроса и предложения угольной продукции на внутреннем и внешнем рынках и пролонгирует срок ее действия на пять лет [1]. Программа соответствует национальным целям и стратегическим задачам развития Российской Федерации.

В преамбуле программы отмечается, что за период с 1994 по 2018 год была практически завершена реализация комплекса мер по реструктуризации угольной промышленности России, осуществлявшаяся за счет средств федерального бюджета. За это время было закрыто 188 шахт и 15 разрезов, ликвидировано более 5 тыс. км горных выработок, снесено 5 247 зданий и сооружений в объеме 15,2 млн м³, проведена рекультивация 6 786,8 тыс. га нарушенных земель, потушены и ликвидированы пожары на 65 породных отвалах и 7 пожаров в подземных выработках, построено 54 водоотливных комплекса и 12 очистных сооружений шахтных вод, отремонтирован 61 объект, пострадавший от ведения горных работ, выполнены 84 мероприятия по обеспечению защиты от затопления смежных действующих питьевых источников от загрязнения и подтопления объектов земной поверхности шахтными водами [2–4].

Период 2010–2020 годов стал для угольной промышленности этапом стабильного развития, который совпал с восстановительным ростом экономики страны. За это время объем добычи российского угля вырос более чем в 1,3 раза и в 2020 году превышал уровень 440 млн т в год, в 2,5 раза (в текущих ценах) вырос объем инвестиций в основной капитал угольных предприятий, введено 297 млн т новых мощностей по добыче угля.

В настоящее время угольная промышленность представлена 58 шахтами и 133 разрезами, почти половина из которых введена после 2000 года. Новые предприятия оснащены высокопроизводительной техникой, на них используются современные технологии угледобычи. По прогрессивной технологии «шахта – лава» работают 42 шахты, или 76 % общего числа действующих шахт. Продолжается концентрация горных работ. На шахтах среднесуточная добыча из одного очистного забоя за 10 лет выросла в среднем по отрасли в 2,2 раза (с 2 211 до 4 883,7 т/сутки), годовая производитель-

ность одноковшовых экскаваторов на разрезах увеличилась в 1,3 раза (с 1 438 до 1 843,3 тыс. м³). Более 70 % угледобычи в 2022 году обеспечивали шахты и разрезы со среднегодовой мощностью 1,6 и 3 млн т соответственно. В результате в отрасли выросла производительность труда работников в основном производстве, которая с 2008 года увеличилась в 1,5 раза, а среднемесячная производительность рабочего по добыче угля выросла за этот период почти в 2 раза (с 202 до 380 т/чел в месяц).

Однако следует иметь в виду, что расширение парка высокопроизводительных комплексов без эффективного решения ряда технологических задач не даст ожидаемого результата. Одной из таких задач является сохранение устойчивости пластовых выемочных выработок. Как показал опыт передовых угледобывающих стран, для охраны выемочных выработок на высокопроизводительных добычных участках более целесообразно применять не сборные крепежные конструкции, а литые полосы из быстротвердеющих сухих смесей [5–9].

Применение литых полос из быстротвердеющих сухих смесей в отечественной и зарубежной практиках

В отечественной горной практике [10, 11] при скорости подвигания очистных забоев не более 2,0 м/сут охранные полосы отливались из быстротвердеющих смесей на песчано-цементной, ангидритовой и фосфогипсовой основе. Рецептуры порошкообразных смесей с жидкими ускорителями твердения, разработанные фирмой BAG Lippe [12], создавали густую консистенцию гидросмеси на выходе из сопла установки, и ее можно было укладывать с крутым откосом даже при скорости подвигания лавы свыше 6 м/сут.

Располагая целой индустрией производства качественных твердеющих смесей и высокопроизводительного оборудования, угольная промышленность Германии к началу 1990-х годов практически полностью перешла на охрану выемочных выработок жесткими полосами различных модификаций, расходуя для этого ежегодно около 0,5 млн т различных смесей.

В 2000-е жесткие литые полосы из импортных порошкообразных смесей начали применяться и на нескольких передовых шахтах Донбасса, где возникла острая необходимость охраны повторно используемых выемочных выработок для применения прямоточных схем проветривания с подсыжением исходящей струи.

В работах [13, 14] представлен обстоятельный анализ результатов внедрения польской быстротвердеющей смеси «Текбленд» на шахтах «Красноармейская-Западная № 1» и имени А. Ф. Засядько, эффективность которой оказалась

значительно ниже, чем это можно было предположить по рекламным материалам и данным сертификата. Рассматривая совокупность всех возможных причин неудовлетворительного состояния охранявшихся литыми полосами выемочных выработок, авторы правильно акцентируют внимание на основных геомеханических вопросах охраны выемочных выработок и исключительной необходимости тампонажа их закрепного пространства, отсутствие которого приводит к преждевременному расслоению вмещающих пород и снижению устойчивости выемочной выработки, пройденной впереди лавы, задолго до появления возможности отливки охранной околострековой полосы. Суммарная величина смещения контура такой выработки у торца возводимой полосы достигает 40 % его полных смещений [15], и поэтому основная задача жесткой литой полосы, как и любой другой ограждающей крепежной конструкции, заключается в поддержании породной консоли на границе охраняемой выработки с выработанным пространством лавы. Однако и эта задача на указанных шахтах не была решена должным образом ни с использованием полос из «Текбленда», ни с ограждающими конструкциями из БЖБТ.

Исследования низкой эффективности литых полос на шахтах Донбасса

Авторы [13, 14] приводят достаточно факторов этого явления. Но основная его причина, по нашему мнению, заключается в следующем.

При одноосном сжатии образцов из хрупких материалов их разрушение происходит путем сдвига по площадкам скольжения, ориентированным к направлению σ_1 под углом ω , равном [16]

$$\omega = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \quad (1)$$

где ρ – угол внутреннего трения материала образца.

У свободной поверхности нагружаемого образца, как это показано на рисунке 1, площадки скольжения формируют призму выпирания AOC , на свободной поверхности которой $\sigma_3 = 0$, а σ_1 в пределах всего объема призмы так же, как и на поверхности образца, равна кубиковой прочности материала.

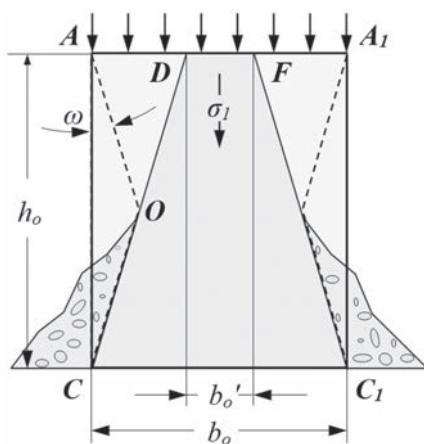


Рис. 1. Схема разрушения призмы из хрупкого материала / Fig. 1. Fracture diagram of a prism made of brittle material

Разрушение хрупких материалов в области AOC начинается при нагрузке P , как правило, меньшей предельной величины P_{max} , и к моменту, когда $P = P_{max}$, контуры образ-

ца CAA_1C_1 в результате его разрушения приобретают новые очертания $CDFC_1$, при которых:

$$b'_0 = b_0 - 2h_0 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right). \quad (2)$$

Из этого следует, что должна существовать и некоторая критическая высота h_o^{kp} , определяемая по формуле

$$h_o^{kp} = 0,5 \cdot b_0 \cdot \cot g\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right). \quad (3)$$

при которой $b'_0 = 0$ и несущая способность образца после достижения $P = P_{max}$ также стремится к нулю.

Таким образом, характер и параметры разрушения образца зависят от соотношения его линейных размеров.

В горном деле подобные закономерности исследовались в двух случаях.

Профессор А. Борисов для оценки несущей способности угольного целика шириной b и высотой h предложил эмпирическую формулу [17]

$$\sigma_{пр} = \sigma_{куб} \sqrt{b/h}, \quad (4)$$

где $\sigma_{пр}$ – предел прочности призмы на сжатие;

$\sigma_{куб}$ – предел прочности на сжатие кубического тела с поперечным сечением, равным сечению тела призмы.

Зависимость показателя K_2 (влияние способа охраны выработки на ее конвергенцию) от отношения ширины околострековой полосы к высоте (b/h) исследовалась в работе [18], а ее графическая интерпретация показана на рисунке 2, из которого видно, что при $b/h < 0,2$ показатель $K_2 = 3$ и конвергенция имеет максимальную величину, характерную для отсутствия средств охраны штрека со стороны выработанного пространства. При $b/h > 0,7$ показатель $K_2 \approx 1$ и дальнейшее увеличение отношения b/h на величину конвергенции практически не влияет. Следовательно, для околострековых полос из быстротвердеющих смесей отношение $b/h = 0,7$ можно рассматривать как критическое.

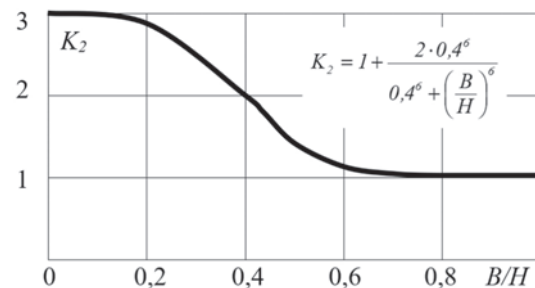


Рис. 2. Зависимость показателя K_2 от отношения ширины околострековой полосы к ее высоте (b/h) /

Fig. 2. Dependence of the K_2 indicator on the ratio of the width of the near-boring strip to its height (b/h)

Авторы статьи исследовали данную закономерность для ограждающих крепежных конструкций из газобетонных блоков, для которых критическое отношение b_0/h_0 ориентировочно можно определить по формуле (3) как

$$b_0/h_0 \geq 2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right). \quad (5)$$

Поскольку у газобетона марки В3,5 $\rho = 50...60^\circ$, то на основании условия (5) критическое отношение размеров конструкций ($K_{b/h}$) из этого газобетона будет составлять

$$K_{b/h} = b_0/h_0 \geq 0,73. \quad (6)$$

Диаграммы нагружения газобетонных призм с линейными размерами $a_0 \times b_0 \times h_0 = 60 \times 60 \times 80$ мм; $60 \times 60 \times 100$ мм и $0,3 \times 0,2 \times 0,6$ м представлены на рисунке 3.

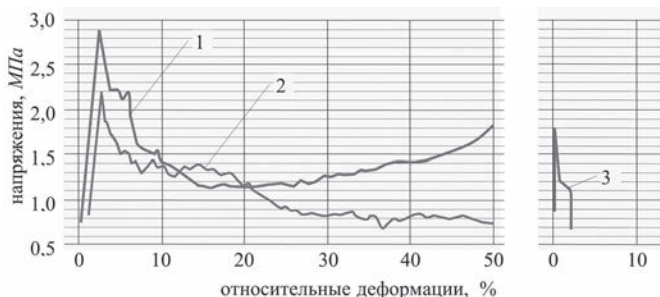


Рис. 3. Диаграммы нагружения образцов газобетона марки В3,5 с различными отношениями линейных размеров: 1 - $b_0/h_0 = 0,75$; 2 - $b_0/h_0 = 0,6$; 3 - $b_0/h_0 = 0,33$ /

Fig. 3. Loading diagrams of samples of aerated concrete grade B3.5 with different ratios of linear dimensions: 1 - $b_0/h_0 = 0,75$; 2 - $b_0/h_0 = 0,6$; 3 - $b_0/h_0 = 0,33$

Как видно из рисунка 3, диаграмма нагружения призмы с отношением $b_0/h_0 = 0,75$ (кривая 1) в качественном отношении мало чем отличается от диаграмм нагружения кубических образцов [19, 20]. На ней присутствуют все характерные стадии и области деформирования, включая область условно постоянного сопротивления и вторичного прессования. Разница заключается в более низких количественных значениях оценочных показателей – коэффициента размаха сопротивления деформированию и удельной работы сопротивления деформированию ($k_c = 0,39$; $a_c = 1,69$ МДж/м³).

На диаграмме нагружения призмы с $b_0/h_0 = 0,6$ (рис. 3, кривая 2) области условно постоянного сопротивления и вторичного прессования отсутствуют. Поэтому $P_{min} = 0$ и, соответственно, $k_c = 0$. Удельная работа сопротивления деформированию снижается до $a_c = 1,34$ МДж/м³. При нагружении призмы с $b_0/h_0 = 0,33$ (рис. 3, кривая 3) предельное напряжение достигло всего лишь 1,8 МПа, а при увеличении относительной деформации до 2,0 % призма была полностью разрушена. Таким образом, характер деформирования газобетонных призм с $b_0/h_0 < 1$ однозначно согласуется с критерием (6), согласно которому призмы с $b_0/h_0 < 0,73$ в запредельном режиме деформирования не обладают несущей способностью.

Округляя этот критерий в большую сторону, принимаем критическую ширину основания газобетонной призмы, равной $b^{кр} = 0,8h$.

Наиболее типичные диаграммы нагружения призм с $b_0/h_0 \geq 1$ представлены на рисунках 4 и 5.

При анализе диаграмм на рисунках 3–5 следует обратить внимание на следующие особенности деформационно-нагрузочных характеристик исследованных призм с различными отношениями линейных размеров:

- на диаграммах нагружения призм с $b_0/h_0 > 1$ (кривые 1 на рис. 4 и 5) в интервале $\epsilon = 10 \dots 30$ % имеются устойчивые области условно постоянного сопротивления. Области вторичного прессования характеризуются высокой скоростью нарастания несущей способности;

- при $\epsilon = 30 \dots 40$ % $P_{ост} = P_{max}$. Значения коэффициента k_c устойчиво превышают 0,5 и приближаются к величине 0,9. Пропорционально этому возрастает и удельная работа сопротивления деформированию;

- при $b_0/h_0 = 1$ параметры запредельной части диаграмм нагружения призм зависят также от соотношения их размеров в плане. С увеличением отношения a_0/b_0 (кривые 2 и 3 на рис. 4) повышается несущая способность призмы в области условно постоянного сопротивления и возрастают значения k_c и a_c , что связано с изменением условий деформирования материала в результате увеличения бокового отпора;

- при изменении прочности материала на диаграммах нагружения призм изменяются только абсолютные значения оценочных показателей, а качественные характеристики диаграмм, обусловленные соотношением линейных размеров призм, сохраняются. Так, на рисунке 5 у образцов с $b_0/h_0 = 1$ при марке газобетона В3,5 (кривая 3) $k_c = 0,42$ и $a_c = 2,4$ МДж/м³, а у газобетона В1,0 (кривая 4) $k_c = 0,41$ и $a_c = 1,19$ МДж/м³. У образцов с $b_0/h_0 = 1,5$ при марке газобетона В3,5 (кривая 1) $k_c = 0,87$ и $a_c = 4,7$ МДж/м³, а при марке В1,0 (кривая 2) $k_c = 0,8$ и $a_c = 1,45$ МДж/м³.

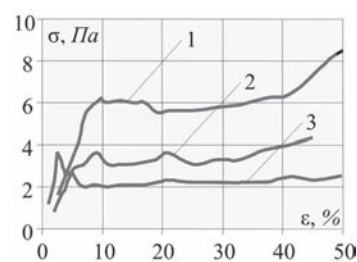


Рис. 4. Диаграммы нагружения образцов Докучаевского газобетона марки В3,5 с линейными размерами ($a_0 \times b_0 \times h_0$): 1 - $6 \times 9 \times 4$ см; 2 - $6 \times 18 \times 6$ см; 3 - $6 \times 9 \times 6$ см /

Fig. 4. Loading diagrams of Dokuchaevsky aerated concrete samples grade B3.5 with linear dimensions ($a_0 \times b_0 \times h_0$): 1 - $6 \times 9 \times 4$ cm; 2 - $6 \times 18 \times 6$ cm; 3 - $6 \times 9 \times 6$ cm

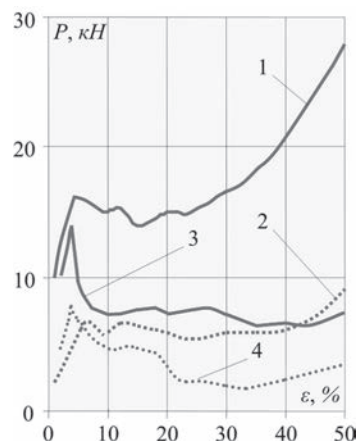


Рис. 5. Диаграммы нагружения образцов Луганского газобетона размерами ($a_0 \times b_0 \times h_0$): 1 - $6 \times 6 \times 4$ см, марка В 3,5; 2 - $6 \times 6 \times 4$ см, марка В1,0; 3 - $6 \times 6 \times 6$ см, марка В3,5; 4 - $6 \times 6 \times 6$ см, марка В1,0 /

Fig. 5. Loading diagrams of Lugansk aerated concrete samples with dimensions ($a_0 \times b_0 \times h_0$): 1 - $6 \times 6 \times 4$ cm, grade В 3,5; 2 - $6 \times 6 \times 4$ cm, grade В1,0; 3 - $6 \times 6 \times 6$ cm, grade В 3,5; 4 - $6 \times 6 \times 6$ cm, grade В1,0

На основании результатов выполненных исследований получены две эмпирические зависимости:

$$k_c = -0,5266(b_0/h_0)^3 + 1,5541(b_0/h_0)^2 - 0,5806(b_0/h_0);$$

$$a_c = 1,1852(b_0/h_0)^3 - 1,5888(b_0/h_0)^2 + 2,755(b_0/h_0),$$

которые представлены на рисунках 6 и 7 в виде полиномов третьей степени с величиной достоверности, равной соответственно $r^2 = 0,902$ и $r^2 = 0,936$.

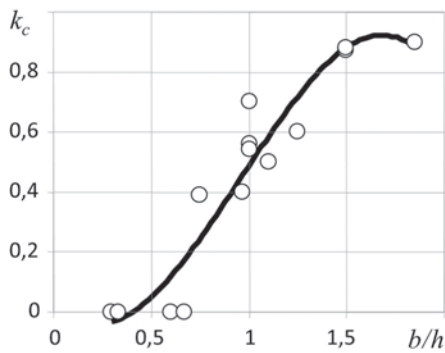


Рис. 6. Эмпирическая зависимость $k_c = f(b/h)$ /
Fig. 6. Empirical dependence $k_c = f(b/h)$

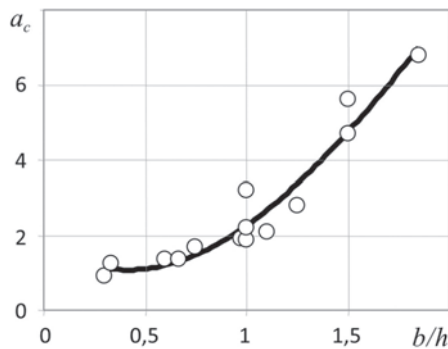


Рис. 7. Эмпирическая зависимость $a_c = f(b/h)$ /
Fig. 7. Empirical dependence $a_c = f(b/h)$

Анализируя эти зависимости, можно сделать вывод, что при увеличении отношения b_0/h_0 свыше 1,5 удельная рабо-

та сопротивления деформированию (a_c) по сравнению с ее значениями при $b_0/h_0 = 1$ увеличивается почти в три раза, а коэффициент k_c стремится к естественному пределу – единице, когда несущая способность газобетона за пределом прочности не может более повышаться. Поэтому дальнейшее увеличение b_0/h_0 не имеет практического смысла, так как в этом случае будет происходить неоправданно высокий расход крепежного материала при незначительном увеличении несущей способности крепежной конструкции.

Выводы

1. Несущая способность и работа сопротивления деформированию (a_c) бетонных призм существенно зависят от отношения их минимальной ширины к высоте (b/h). Призмы с $b/h < 0,8$ являются неустойчивыми и при нагрузке, равной пределу их прочности, быстро теряют несущую способность. При $b/h = 1,0-1,5$ остаточная несущая способность призм в области условно постоянного сопротивления увеличивается до уровня $(0,7-0,8)P_{max}$, а показатель a_c возрастает более чем в два раза.

2. При увеличении отношения b/h свыше 1,5 удельная работа сопротивления деформированию по сравнению с ее значениями при $b/h = 1$ увеличивается почти в три раза, а коэффициент k_c стремится к естественному пределу – единице, когда несущая способность газобетона за пределом прочности не может более повышаться. Поэтому дальнейшее увеличение b/h не имеет практического смысла, так как в этом случае будет происходить неоправданно высокий расход крепежного материала при незначительном увеличении несущей способности крепежной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шабаров А.Н., Куранов А.Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ. *Горный журнал*. 2023; 5: 5-10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01>.
Shabarov A.N., Kuranov A.D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical condition. *Mining magazine*. 2023; 5: 5-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01>.
2. Корзун А.В., Янко С.В. Некоторые аспекты состояния и перспектив угольных предприятий Украины. *Уголь Украины*. 2002; 6: 3-6.
Korzun A.V., Yanko S.V. Some Aspects of the Current State and Prospects of Coal Enterprises in Ukraine. *Coal of Ukraine*, 2002; 6: 3-6. (In Russ.).
3. Дрибан В.А., Дуброва Н.А., Ходырев Е.Д. и др. Актуальные проблемы геомеханики обводненных горных массивов. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* 2024; 2 (40): 70-84. <https://doi.org/10.24412/2519-2418-2024-240-70-84>.
Driban V.A., Dubrova N.A., Khodyrev Ye.D., et al. *Actual problems of geomechanics of water-saturated rock mas. Transactions of RANIMI*. 2024, 2 (40): 70-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2519-2418-2024-240-70-84>.
4. Дрибан В.А., Петрушин А.Г. Влияние обводненности массива горных пород на НДС при подземной разработке угольных пластов в пространственной постановке задачи. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр.* 2022; 18-19 (23-24): 39-81. <https://doi.org/10.24412/1996-885X-2022-18-1933-34-39-81>.
Driban V.A., Petrushin A.G. Influence of water cut of a rock mass on SSS during underground mining of coal seams in the spatial formulation of the problem. *Transactions of RANIMI*. 2022; 18-19 (23-24): 39-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1996-885X-2022-18-1933-34-39-81>.
5. Frenelus W., Peng H., Zhang J. An Insight from Rock Bolts and Potential Factors Influencing Their Durability and the Long-Term Stability of Deep Rock Tunnels. *Sustainability*. 2022; 14 (17): 10943. <https://doi.org/10.3390/su141710943>.
6. Frenelus W., Peng H., Zhang J. Seepage Actions and Their Consequences on the Support Scheme of Deep-Buried Tunnels Constructed in Soft Rock Strata. *Infrastructures*. 2024; 9 (1): 13. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010013>.
7. Murmu S., Budi G. Spalling Hazard Occurrence in Longwall Excavation: a Case Study. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023; 40 (5): 1899-1919. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00828-9>.
8. Kien D.V., Anh Do.N., Thai Do.N. Numerical simulation of the stability of rock mass around large underground cavern. *Civil engineering Journal*. 2022; 8 (1): 81-91. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-01-06>.
9. Mhlongo S.E. Physical hazards of abandoned mines: A review of cases from South Africa. *Extractive Industries and Society*. 2023; 15: 101285. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101285>.
10. Дашко Р.Э., Романов И.С. Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н). *Записки Горного института*. 2021; 247: 20-32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>.
Dashko R.E., Romanov I.S. Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka autonomous region, Anadyr district). *Journal of Mining Institute*. 2021; 247: 20-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>.

11. Пивень Ю.А., Васютина В.В., Канин В.А. Совершенствование бесцепоковых способов охраны подготовительных горных выработок. *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2022; 2 (79): 60-65. <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2022-2-60-65>.
Piven Yu.A., Vasyutina V.V., Kanin V.A. Improvement of Pillarless Methods for Protecting Development Mine Workings. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2022; 2 (79): 60-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0136-4545-2022-2-60-65>.
12. Хове Г. Новые технические средства для разработки наклонных угольных пластов. *Глюкауф*. 1988; 4/5: 15-20.
Khove G. New Technical Means for the Development of Inclined Coal Seams. *Glueckauf*. 1988; 4/5: 15-20. (In Russ.).
13. Зборщик М.П., Ильяшов М.А., Костенко А.В. Охрана подготовительных выработок жесткими литыми полосами из быстротвердеющих материалов. *Известия Донецкого горного института*. 2002; 2: 27-31.
Zborshchik M.P., Ilyashov M.A., Kostenko A.V. Protection of Development Workings with Rigid Cast Strips Made of Rapid-Hardening Materials. *Proceedings of the Donetsk Mining Institute*. 2002; 2: 27-31. (In Russ.).
14. Ильяшов М.А., Костенко В.К., Костенко А.В. Практика охраны подготовительных горных выработок литыми полосами при интенсивной отработке угольных пластов. *Проблемы гірського тиску*. 2003; 9: 40-74.
Ilyashov M.A., Kostenko V.K., Kostenko A.V. Practice of Protecting Development Mine Workings with Cast Strips under Intensive Coal Seam Mining. *Problems of Rock Pressure*. 2003; 9: 40-74. (In Russ.).
15. Канин В.А., Анциферов А.В. Охрана горных выработок газобетонной крепью. Донецк, 2004: 396.
Kanin V.A., Antsiferov A.V. Protection of Mine Workings with Aerated Concrete Support. Donetsk, 2004: 396. (In Russ.).
16. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. Москва, 1976: 272.
Fisenko G.L. Ultimate States of Rocks around Mine Workings. Moscow, 1976: 272. (In Russ.).
17. Борисов А.А., Нифонтов Б.И., Ромадин Н.М. Расчет напряжений в междукammerных целках. *Записки Горного института*. 1966; 51 (1): 78-84.
Borisov A.A., Nifontov B.I., Romadin N.M. Stress Calculation in Inter-Chamber Pillars. *Proceedings of the Mining Institute*. 1966; 51 (1): 78-84. (In Russ.).
18. Гетце В., Бушман Н., Шпроер Д. Требования к вяжущим материалам, используемым для упрочнения пород, охраны и крепления горных выработок. *Глюкауф*. 1984; 21: 8-26.
Getze V., Buschman N., Schroer D. Requirements for Binders Used for Rock Strengthening, Protection, and Support of Mine Workings. *Glueckauf*. 1984; 21: 18-26. (In Russ.).
19. Канин В.А. Механические испытания газобетонных крепежных конструкций. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2001; 3: 75-84.
Kanin V.A. Mechanical Testing of Aerated Concrete Support Structures. *Physico-Technical Problems of Mining Production*. 2001; 3: 75-84. (In Russ.).
20. Викторов С.Д., Гончаров С.А., Иофис М.А. и др. Механика сдвига и разрушения горных пород. Москва, 2019: 360.
Viktorov S.D., Goncharov S.A., Iofis M.A., et al. *Mekhanika sdvizheniya i razrusheniya gornyh porod*. Moscow, 2019: 360. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Владимир Алексеевич Канин –
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник отдела горного давления, ФГБНУ
«РАНИМИ», г. Донецк, Российская Федерация;
Scopus Author ID 50961141800;
e-mail: vlkanin2@yandex.ru



Юрий Анатольевич Пивень –
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник отдела горного давления, ФГБНУ
«РАНИМИ», г. Донецк, Российская
Федерация; e-mail: ranimi@ranimi.org



Борис Валентинович Хохлов –
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник отдела горного давления, ФГБНУ
«РАНИМИ», г. Донецк, Российская Федерация;
e-mail: hbv@bk.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Kanin –
Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Rock
Pressure Department, Republican Academic
Scientific, Research and Design Institute for Mining
Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine
Surveying”, Donetsk, Russian Federation; Scopus
Author ID 50961141800;
e-mail: vlkanin2@yandex.ru

Yuri A. Piven –
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the
Rock Pressure Department, Republican Academic
Scientific, Research and Design Institute for Mining
Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine
Surveying”, Donetsk, Russian Federation;
e-mail: ranimi@ranimi.org

Boris V. Khokhlov –
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the
Rock Pressure Department, Republican Academic
Scientific, Research and Design Institute for Mining
Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine
Surveying”, Donetsk, Russian Federation;
e-mail: hbv@bk.ru



Антон Викторович Антипенко –
младший научный сотрудник отдела горного
давления, ФГБНУ «РАНИМИИ», г. Донецк,
Российская Федерация;
e-mail: ministrxp@mail.ru

Anton V. Antypenko –
Junior Researcher of the Rock Pressure
Department, Research and Design Institute for
Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and
Mine Surveying”, Donetsk, Russian Federation;
e-mail: ministrxp@mail.ru

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьёй.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.01.2026

Принята к публикации: 26.01.2026

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 30.10.2025

Revised: 16.01.2026

Accepted: 26.01.2026