

Научная статья

УДК 622.831:013

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-108-114

ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ЗОНАХ ПОВЫШЕННОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ВЫБРОСООПАСНОСТЬ ПЛАСТА

Гречишкин Павел Владимирович^{1,*},
Соколов Константин Владимирович²
Трошков Николай Юрьевич¹

¹ Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр «ВНИМИ»

² ш. «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-Уголь»

*для корреспонденции: pv_grechishkin@mail.ru

Аннотация.

Рассматриваются процессы формирования зон повышенного горного давления (ЗПГД). Выполнено численное моделирование условий, при которых распространение ЗПГД может достичь наибольшего развития. Приводится механизм и параметры действия зон повышенного горного давления. Предложено рассматривать развитие геомеханических процессов в ЗПГД с единой позиции механизма трещинообразования и разрушения углей и боковых пород, что позволило разработать универсальный подход к определению и разграничению зон повышенной завало- и выбросоопасности в пределах ЗПГД. Дано обоснование изменения коэффициента связи K в зависимости от деформационных свойств горных пород (коэффициента Пуассона и бокового распора). Описана связь между максимальными нормальными и касательными напряжениями и деформационными свойствами угольных пластов и боковых пород, которая объясняет эмпирически установленное различие параметров ЗПГД для выбора мероприятий, обеспечивающих безопасность горных работ по фактору выбросов и обрушений кровли. Показано влияние деформационных свойств пород на характер проявления горного давления в ЗПГД. Дано объяснение развития структурных дефектов в зонах ПГД с учетом рассмотрения физических процессов, протекающих в углях и породах. Результаты экспериментов показали, что при изменяющемся во времени уровне приложенных напряжений долговечность образцов горных пород зависит от суммы накопленных трещин и процесс их накопления необратим. Приведены результаты анализа соотношений максимальных нормальных и касательных напряжений в зонах повышенного горного давления и показана зависимость развития структурных дефектов в угольных пластах и боковых породах от коэффициента Пуассона и времени действия повышенных нагрузок.



Информация о статье

Поступила:

22 апреля 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:

зона повышенного горного давления, горный массив, пласт, напряжение, деформации, коэффициент Пуассона.

Для цитирования: Гречишкин П. В., Соколов К. В., Трошков Н. Ю. Причины образования и развития структурных дефектов в зонах повышенного горного давления и влияние их на выбросоопасность пласта // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 108-114. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-108-114, EDN: ICCPJK

Введение

Периоды формирования комплекса геомеханических, газодинамических и структурных (в отношении структуры углей и пород угленосной толщи) явлений, составляющих опасные зоны повышенного горного давления, возможно классифицировать по аналогии с процессами сдвижения:

- динамический, когда процесс сдвижения еще не завершен, или хотя бы период опасных деформаций, когда он наиболее активен;

- статический, когда процесс сдвижения завершен и опасность в зонах повышенного горного давления (ЗПГД) формируется за счет продавливающего влияния целика или краевой части, образующей ЗПГД, а также за счет изменения структуры угля и пород угленосной толщи (рост трещиноватости, доли фильтрующих пород и трещин), оказавшихся в ЗПГД, в том числе в динамический период.

Необходимо заметить, что имеют место случаи, когда ЗПГД никак не отражаются на характере и производительности горных работ и о них вспоминают как о серьезном осложняющем факторе, когда случается аварийная ситуация или несчастный случай.

«Динамический период» – это период «оформления» источника возникновения ЗПГД, целика или краевой части. Характеризуется интенсивным расслоением, делением на блоки, уменьшением распора и наклоном в сторону выработанного пространства, как пород, оказавшихся над целиком (краевой частью) в границах, приблизительно определяемых граничными углами сдвижения, так и в породах под целиком (краевой частью), хотя с меньшей интенсивностью [1]. Поскольку полностью аналитически оценить этот процесс не представляется возможным, проведено численное моделирование условий, при которых распространение ЗПГД могло достичь наибольшего развития.

Предполагается, что в сплошном массиве при движении лавы за очистным забоем на расстоянии, примерно равном длине лавы, наблюдаются активные процессы расслоения и подвижек вдоль контактов слоев в подработанной толще горного массива. Это приводит к уменьшению напряжений в подработанном массиве и росту размеров защищенной и разгруженной зон, и, как следствие, увеличению размеров ЗПГД в кровле от краевых частей пластов.

Механизм и параметры действия зон повышенного горного давления

Анализ статистического материала показывает, что в 20–40% случаев ЗПГД себя не проявляют ни газодинамической, ни динамической опасностью, ни поведением крепи, ни темпом проходки. Вместе с тем проявляющиеся катастрофические случаи и

аварийные ситуации в абсолютном большинстве приурочены к ЗПГД. Поэтому необходимо продолжить исследования механизма формирования ЗПГД, а также опасных или безопасных условий ведения горных работ в них. Основные усилия необходимы в выяснении структурных изменений и геодинамических условий, приводящих к катастрофическим явлениям. Для этого рекомендуется шире применять натурные шахтные и геофизические методы исследований пород, подвергавшихся действию ЗПГД [2-4].

Ведение горных работ в зонах повышенного горного давления от целиков и краевых частей соседних пластов осложняется повышенной завало- и выбросоопасностью, снижением устойчивости боковых пород. Так как эти явления в ЗПГД обусловлены развитием геомеханических процессов, то их необходимо рассмотреть с единых позиций механизма трещинообразования и разрушения углей и боковых пород, что позволит разработать универсальный подход к определению и разграничению зон повышенной завало- и выбросоопасности в пределах ЗПГД и обосновать геомеханические требования к комплексу мер безопасности в этих зонах.

Обычно механизм и параметры действия ЗПГД рассматривали исходя из положения о распространении под и над целиками и краевыми частями нормальных напряжений, действующих перпендикулярно к напластованию [1, 2]. Уровень этих напряжений σ_1 сравнивали с напряжениями σ_0 , действующими на участках, не подверженных влиянию горных работ, $\sigma_0 = \gamma H$, где γ – плотность пород; H – глубина разработки. При этом горизонтальные компоненты напряжений σ_2 и σ_3 , определяющие значение бокового отпора, составляют $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \gamma H$, где $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ – коэффициент бокового отпора, определяемый из формулы Динника; μ – коэффициент пропорциональности между относительными поперечной и продольной деформациями (коэффициент Пуассона), т.е. значение бокового отпора определяется коэффициентом Пуассона. Следовательно, максимальные касательные напряжения в зоне, не подверженной влиянию горных работ, рассчитываем по формуле

$$\tau_{0max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{(1 - \lambda)\sigma_1}{2}. \quad (1)$$

В зоне ПГД значение нормальных к напластованию напряжений составляет $(1 + K_\sigma)\gamma H$ где $K_\sigma = (\sigma_1 - \gamma H) / (\gamma H)$ – коэффициент, показывающий превышение нормальных напряжений над геостатическим. Отсюда максимальные касательные напряжения в зонах ПГД определяются следующим образом:

$$\tau_{max} = \frac{[(1 + K_{\sigma})\gamma H - \lambda\gamma H]}{2} = \frac{(1 + K_{\sigma} - \lambda)\gamma H}{2}. \quad (2)$$

Коэффициент увеличения действующих максимальных касательных напряжений $K_{\tau} = (\tau_{max} - \tau_{0max})/\tau_{0max}$ с учетом выражений (1) и (2) примет вид

$$K_{\tau} = \frac{K_{\sigma}}{1 - \lambda}. \quad (3)$$

Выразив в формуле (3) коэффициент бокового отпора λ через μ , получим $K_{\tau} = K_{\sigma}(1 - \mu)/(1 - 2\mu)$. Следовательно, коэффициент связи увеличения максимальных касательных напряжений с увеличением главного нормального напряжения

$$K = (1 - \mu)/(1 - 2\mu). \quad (4)$$

Физический смысл коэффициента связи можно пояснить на следующем примере. Для пород с $\mu = 0,4$ коэффициент связи $K = 3$. Так как $K_{\tau} = K_{\sigma}K$, то в ЗПГД при нормальных напряжениях, превышающих исходные на 10%, максимальные касательные напряжения возрастут на 30%.

Так как реальный углевмещающий массив горных пород состоит из слоев с различными деформационными свойствами, то боковое давление зависит от типов пород. Характер изменения значений коэффициента связи K от коэффициентов Пуассона μ и бокового распора λ показан на Рис. 1. При возрастании $\mu > 0,35$ ($\lambda > 0,5$) наблюдается резкое увеличение K . Это можно объяснить при рассмотрении кругов Мора для различных типов пород (Рис. 2). Кривая 2 характеризует напряженное состояние песчаника ($\sigma_1 = \gamma H$, $\sigma_2 = 0,25\gamma H$, $\mu = 0,2$). Кривая 4 соответствует напряженному состоянию угля ($\sigma_1 = \gamma H$, $\sigma_3 = 0,82\gamma H$, $\mu = 0,45$). Представим, что участок массива с контактом песчаник – угольный пласт находится в зоне ПГД с дополнительным горным давлением $\Delta\sigma_1 = 50\%$. Новое напряженное состояние отражено на Рис. 2 диаграммами 1 (для песчаника: $\sigma_1 = 1,5\gamma H$, $\sigma_2 = 0,25\gamma H$) и 3 (для угля: $\sigma_1 = 1,5\gamma H$, $\sigma_2 = 0,82\gamma H$). Тогда для песчаника при $\mu = 0,2$ $K = 1,33$, а для угля при $\mu = 0,45$ $K = 5,5$. Для песчаника максимальные касательные напряжения возросли на $\Delta\tau_{max} = \Delta\sigma_1 K = 66,7\%$, а для угля $\Delta\tau_{max} = 275\%$ и составляют в зоне ПГД 375%.

Результаты исследования. Обсуждение

Описанная связь между максимальными нормальными и касательными напряжениями и деформационными свойствами угольных пластов и боковых пород объясняет эмпирически установленное различие параметров ЗПГД для выбора мероприятий, обеспечивающих безопасность горных работ по фактору выбросов и обрушений пород кровли [2, 5-8].

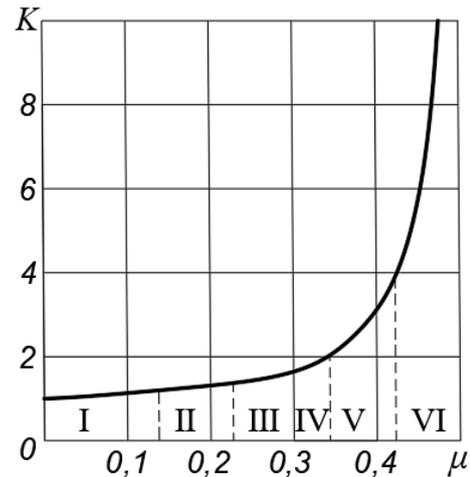


Рис. 1. График изменения коэффициента связи в зависимости от деформационных свойств горных пород

Fig. 1. Graph of the change in the coupling coefficient depending on the deformation properties of rocks

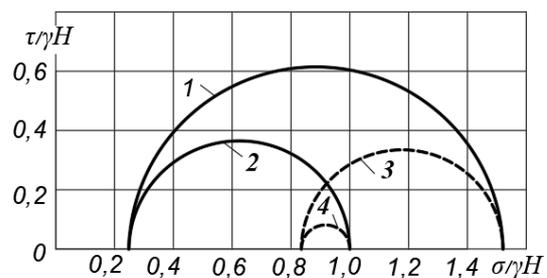


Рис. 2. Типичные круги Мора для углей и пород при различных условиях нагружения

Fig. 2. Typical Mohr circles for coals and rocks under various loading conditions

Влияние деформационных свойств пород на характер проявления горного давления в ЗПГД можно объяснить следующим образом. Устойчивость пород кровли зависит от коэффициента Пуассона [5, 9-11]: $\mu < 0,14$ – весьма устойчивая кровля (см. Рис. 1, зона I); $\mu = 0,14 \dots 0,22$ – устойчивая (см. Рис. 1, зона II); $\mu = 0,23 \dots 0,30$ – средней устойчивости (см. Рис. 1, зона III); $\mu = 0,31 \dots 0,34$ – неустойчивая (см. Рис. 1, зона IV); $\mu = 0,35 \dots 0,42$ – весьма неустойчивая (см. Рис. 1, зона V); $\mu > 0,4$ – выбросоопасные угольные пласты (см. Рис. 1, зоны V и VI). Пересчитав приведенные значения для μ для K , получим 1,2; 1,3; 1,5; 2,0; 3,0 соответственно для вышеназванных типов пород. Поэтому действие ЗПГД на повышение выбросоопасности пластов проявляется на большем расстоянии, чем на устойчивость боковых пород, и чем мягче и слабее уголь или порода, тем ярче проявляется влияние ЗПГД. Дифференциация ЗПГД по степени опасности, параметрам распространения и выбор комплекса мер безопасности должны производиться с

учетом свойств угольных пластов и боковых пород.

Однако объяснение развития структурных дефектов в зонах ПГД только повышенным уровнем напряжений в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия, без рассмотрения физических процессов, протекающих в углях и породах, было бы неполным, поскольку согласно кинетической концепции разрушения твердых тел, наиболее приемлемой для горных пород, предел прочности материала не имеет физического смысла [12]. В результате неравномерного распределения нагрузок в локальных микроочагах будущих разрушений перегружаются межatomные связи, которые затем распадаются в результате термофлуктуационной деструкции углей и пород с образованием субмикротрещин за счет группирования распавшихся связей. Основным показателем процесса перестройки структуры горных пород является время от начала нагружения до разрушения, причем наличие касательных напряжений, действующих в массиве в течение длительного времени, только снижает энергетический барьер atomных связей. Эксперименты показали, что при изменяющемся во времени уровне приложенных напряжений долговечность образцов горных пород зависит от суммы накопленных трещин и процесс их накопления необратим. Основной вклад во время «жизни» материала под нагрузкой вносят стадии образования субмикротрещин, а затем микротрещин, которые образуются, когда количество субмикротрещин в объеме позволяет им взаимодействовать между собой [12]. Результаты экспериментальных исследований влияния длительных нагрузок на деформационные характеристики образцов горных пород при их последующем испытании показали, что при одноосном нагружении образец запоминает максимальное значение предыдущей нагрузки, а при объемном – значение разности главных напряжений [13]. Микротрещины, образуясь и развиваясь по направлению главного напряжения в условиях объемного напряженного состояния, близкого к всестороннему сжатию, не объединяются друг с другом. Происходит процесс скольжения под углом 45° к направлению главного напряжения, в который вовлекаются уже образованные накопленные трещины [14].

В зонах ПГД механизм деструкции углей и пород вследствие их естественной и искусственной гетерогенности обуславливает формирование структурных аномалий и предопределяет наличие критерия (порогового значения) времени, необходимого для стохастического накопления структурных дефектов, совокупность которых определяет формирование газодинамических аномалий,

приводящих к повышению выбросоопасности и снижению устойчивости боковых пород [15, 16]. Значение критерия времени функционально зависит от значения пригрузок в зонах ПГД, а также свойств углей и пород. Преобладание в условиях всестороннего сжатия разрушения и препарирования пород и углей по плоскостям скольжения под действием максимальных касательных напряжений, которые концентрируются у границ очистных работ, объясняет наибольшую опасность перехода створов с целиками и краевыми частями соседних пластов. Причем каждый угольный пласт с боковыми породами можно представить как систему, обладающую собственными предельными условиями нагружения по факторам устойчивости пород кровли и выбросоопасности пластов.

Выводы

1. Совершенствование методик построения зон ПГД должно быть направлено на учет деформационных свойств углей, боковых пород и времени действия ЗПГД.

2. Выполненный анализ доказывает, что исходя из общих предпосылок изменения структуры углей и пород под действием повышенных нагрузок, возможна разработка методики построения зон ПГД для обеспечения безопасности от выбросов и завалов на единой основе.

3. В массиве под действием повышенного горного давления формируются и развиваются системы субмикротрещин, реализующиеся по мере увеличения нагрузок при подходе очистного забоя, по заранее заданным плоскостям сдвига и ослабления.

4. Наличие в массиве достаточной системы плоскостей скольжения изменяет паспорт прочности, заставляет породы в условиях объемного сжатия разрушаться (деформироваться) по ним без образования новых плоскостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канин В. А., Пивень Ю. А., Васютина В. В. Совершенствование инженерного метода построения зон повышенного горного давления при разработке свиты угольных пластов // Журнал теоретической и прикладной механики. 2023. № 4(85). С. 81–88.

2. Воскобоев Ф. Н., Аносов О. С., Шаповал Н. А. Управление кровлей в зонах повышенного горного давления при разработке свит крутых пластов // Уголь Украины. 1988. № 2. С. 4–6.

3. Bondarenko V., Symanovych H., Barabash M. Determining patterns of the geomechanical factors influence on the fastening system loading in the preparatory mine workings // Mining of Mineral Deposits. 2020. Vol. 14(1). Pp. 44–50.

4. Луганцев Б. Б., Беликова Н. В., Беликов В. В.,

Чавкин А. И. Поддержание выработки для повторного использования в аномальной зоне повышенного горного давления // Уголь. 2021. № 4. С. 10–14.

5. Ржевский В. В. Управление свойствами и состоянием угольных пластов с целью борьбы с основными опасностями в шахтах. М. : Недра, 1984. 327 с.

6. Кузнецов Г. Н. Методы оценки степени анизотропии и структурного ослабления трещиноватого массива горных пород // Гидротехн. стр-во. 1986. № 2. С. 33–40.

7. Новичихин И. А., Ильяшов М. А., Беляков П. К. [и др.] Методические рекомендации по планированию развития горных работ на пластах в зонах влияния очистных выработок соседних пластов на шахтах Донбасса. Донецк : ЦБНТИ Минуглепрома СССР, 1987. 48 с.

8. Zhang Q., Yang K., Zhang J., Wang Q., Yuan L., Shi Z., Xu X. A Theoretical Model Of Roof Self-Stability In Solid Backfilling Mining And Its Engineering Verification // *Applied Sciences*. 2022. № 12. Pp. 12114.

9. Масаев Ю. А., Масаев В. Ю. Влияние геомеханических характеристик породного массива на безаварийную разработку угольных месторождений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022. № 4. С. 6–13.

10. Копытов А. И., Масаев Ю. А., Масаев В. Ю.

Исследование влияния физических свойств горных пород на прочностные показатели породных обнажений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 4. С. 92–101.

11. Wang Y., Liu J., Yang J., [et al.] Stability characteristics of a fractured high roof under nonpillar mining with an automatically formed roadway by using a visualized discrimination approach // *Energy Sci Eng*. 2020. № 8. Pp. 1541–1553.

12. Норель Б. К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. М. : Наука, 1982. 128 с.

13. Проскураков Н. М., Карташов Ю. М., Ильинов М. Д. Эффекты памяти горных пород при различных видах их нагружения // Эффекты памяти в горных породах. М. : МГИ, 1986. С. 22–28.

14. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М. : Недра, 1985. 271 с.

15. Воскобоев Ф. Н., Распопов В. И., Остапенко А. Ф. [и др.] Управление горным давлением в механизированных очистных забоях. М. : Недра, 1983. 199 с.

16. Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. П. [и др.] Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // Физико-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1987. № 1. С. 9–21.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Гречишкин Павел Владимирович, директор, Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр “ВНИМИ”» (650002, Россия, г. Кемерово, Проспект им. академика Леонида Барбараша, д. 1, оф. 502), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3974-2685>, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

Соколов Константин Владимирович, главный инженер, ш. «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-Уголь» (652607, Россия, г. Белово, ул. 1 Телеут, д. 27/2, пом. 1), e-mail: office@mmk-coal.ru

Трошков Николай Юрьевич, заместитель директора, Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр “ВНИМИ”» (650002, Россия, г. Кемерово, Проспект им. академика Леонида Барбараша, д. 1, оф. 502), e-mail: troshkoff1973@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Гречишкин Павел Владимирович – генерация идеи исследования и постановка задач, разработка методологии, анализ результатов, выводы.

Соколов Константин Владимирович – разработка математического аппарата, сбор и анализ данных, написание текста.

Трошков Николай Юрьевич – разработка методологии эксперимента, контроль расчетов, обоснование результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THE CAUSES OF THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF STRUCTURAL DEFECTS IN AREAS OF HIGH ROCK PRESSURE AND THEIR EFFECT ON THE EJECTION HAZARD OF THE FORMATION

Pavel V. Grechishkin ^{1,*},
Konstantin V. Sokolov ²
Nikolai Yu. Troshkov ¹

¹ Kemerovo branch of JSC Research Institute of Rock Mechanics and Mine Survey – Inter-branch Research Center "VNIMI", 650002, Russia, Kemerovo, Prospekt im. Academician Leonid Barbarash, 1, office 502

² Chertinskaya-Koksovaya sh., MMK-Ugol LLC, 652607, Russia, Belovo, 1 Teleut str., 27/2, room 1

*for correspondence: pv_grechishkin@mail.ru



Article info

Received:

22 April 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: high mountain pressure zone, mountain range, formation, stress, deformation, Poisson's ratio..

Abstract.

The processes of formation of zones of increased mountain pressure are considered. Numerical modeling of the conditions under which the spread of zones of increased mountain pressure can achieve the greatest development is performed. The mechanism and parameters of the action of zones of increased mountain pressure are given. It is proposed to consider the development of geomechanical processes in areas of high rock pressure from a single position of the mechanism of cracking and destruction of coal and side rocks, which allowed us to develop a universal approach to defining and delimiting zones of increased blockage and emission hazards within zones of high rock pressure. The substantiation of the change in the coupling coefficient K depending on the deformation properties of rocks (Poisson's ratio and lateral expansion) is given. The relationship between maximum normal and tangential stresses and deformation properties of coal seams and lateral rocks is described, which explains the empirically established difference in the parameters of zones of increased rock pressure for the selection of measures ensuring the safety of mining operations by the factor of emissions and roof collapses. The influence of the deformation properties of rocks on the nature of the manifestation of rock pressure in areas of increased rock pressure is shown. An explanation of the development of structural defects in areas of high rock pressure is given, taking into account the consideration of physical processes occurring in coals and rocks. The experimental results showed that with a time-varying level of applied stresses, the durability of rock samples depends on the amount of accumulated cracks and the process of their accumulation is irreversible. The results of the analysis of the ratios of maximum normal and tangential stresses in areas of increased rock pressure are presented and the dependence of the development of structural defects in coal seams and lateral rocks on the Poisson's ratio and the duration of increased loads is shown.

For citation: Grechishkin P.V., Sokolov K.V., Troshkov N.Y. The causes of the formation and development of structural defects in areas of high rock pressure and their effect on the ejection hazard of the formation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):108-114. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-108-114, EDN: ICCPJK

REFERENCES

1. Kanin V.A., Piven Yu.A., Vasyutina V.V. Improvement of the engineering method for constructing zones of increased rock pressure during the development of a formation of coal seams. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2023; 4(85):81–88.
2. Voskoboev F. N., Anosov O. S., Shapoval N. A. Roof management in areas of high mountain pressure

during the development of formations of steep formations. *Coal of Ukraine*. 1988; 2:4–6.

3. Bondarenko V., Symanovych H., Barabash M. De-termining patterns of the geomechanical factors influence on the fastening system loading in the preparato-ry mine workings. *Mining of Mineral Deposits*. 2020; 14(1):44–50.
4. Lugantsev B.B., Belikova NV., Belikov V.V., Chav-kin A.I. Maintenance of production for reuse in the

anomalous zone of increased mountain pressure. *Coal*. 2021; 4:10–14.

5. Rzhnevsky V.V. Management of the properties and condition of coal seams in order to combat the main hazards in mines. M.: Nedra; 1984. 327 p.

6. Kuznetsov G. N. Methods for assessing the degree of anisotropy and structural weakening of a fractured rock mass. *Gidrotehn. page*. 1986; 2:33–40.

7. Novichikhin I.A., Ilyashov M.A., Belyakov P.K. [et al.] Methodological recommendations for planning the development of mining operations in formations in the zones of influence of the treatment workings of neighboring formations in the mines of Donbass. Donetsk: Central Research Institute of the Ministry of Coal Industry of the USSR; 1987. 48 p.

8. Zhang Q., Yang K., Zhang J., Wang Q., Yuan L., Shi Z., Xu X. A Theoretical Model Of Roof Self-Stability In Solid Backfilling Mining And Its Engineering Verification. *Applied Sciences*. 2022; 12:12114.

9. Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. The influence of geomechanical characteristics of a rock mass on the safe development of coal deposits. *Bulletin of the scientific center for safety works in the coal industry*. 2022; 4:6–13.

10. Kopytov A.I., Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Investigation of the influence of physical properties of rocks on strength parameters of rock formations. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023; 4:92–101.

11. Wang Y., Liu J., Yang J. [et al.] Stability characteristics of a fractured high roof under nonpillar mining with an automatically formed roadway by using a vis-ualized discrimination approach. *Energy Sci Eng*. 2020; 8:1541–1553.

12. Norel B.K. Change in the mechanical strength of a coal seam in an array. M.: Nauka; 1982. 128 p.

13. Proskuryakov N.M., Kartashov Yu.M., Ilyinov M.D. Effects of memory of rocks under various types of their loading. *Effects of memory in rocks*. M.: MGI; 1986. Pp. 22–28.

14. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Strength of rocks and stability of workings at great depths. M.: Nedra; 1985. 271 p.

15. Voskoboev F.N., Raspopov V.I., Ostapenko A.F. [et al.] Control of rock pressure in mechanized treatment faces. M.: Nedra; 1983. 199 p.

16. Kuksenko V.S., Inzhevatin I.E., Manjikov B.P. [et al.] Physical and methodological foundations of forecasting mountain impacts. *Physico-technical. probl. development. got in. Fossils*. 1987; 1:9–21.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Pavel V. Grechishkin, Director, Kemerovo branch of JSC Research Institute of Rock Mechanics and Mine Survey – Inter-branch Research Center "VNIMI" (650002, Russia, Kemerovo, Prospekt im. academician Leonid Barbarash, d. 1, office 502), Candidate of Technical Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3974-2685>, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

Konstantin V. Sokolov, Chief Engineer, Chertinskaya-Koksovaya sh., MMK-Ugol LLC (652607, Russia, Belovo, 1 Teleut str., 27/2, room1), e-mail: office@mmk-coal.ru

Nikolay Yu. Troshkov, Deputy Director Kemerovo branch of JSC Research Institute of Rock Mechanics and Mine Survey – Inter-branch Research Center "VNIMI" (650002, Russia, Kemerovo, Prospekt im. academician Leonid Barbarash, d. 1, office 502), e-mail: troshkoff1973@mail.ru

Contribution of the authors:

Pavel V. Grechishkin – generation of the research idea and formulation of tasks, development of methodology, analysis of results, conclusions.

Konstantin V. Sokolov – development of mathematical apparatus, data collection and analysis, writing text.

Nikolay Yu. Troshkov – development of experimental methodology, control of calculations, substantiation of results.

All authors have read and approved the final manuscript.

