

Выбор технологических параметров подготовительной выработки и локального метода предотвращения газодинамических явлений

Е.И. Колесниченко✉, И.Е. Колесниченко, Е.И. Любомищенко

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

✉ Kolesnichenko-2718@rambler.ru

Резюме: Цель исследования заключалась в выборе параметров проведения подготовительной выработки с учетом влияния горных работ на формирование газодинамических явлений, разработке метода деформирования и дегазирования угольного пласта впереди забоя, в уточнении причинно-следственных закономерностей образования энергетических и динамических процессов взаимодействия в углепородном массиве и обосновании критерия безопасного подвигания забоя. Причинно-следственный метод сравнения руководящих документов с реальной характеристикой выброшенного угля показал, что свойства и признаки в рекомендациях не отражают свойств газодинамической опасности. Не учтено различие ингредиентов и фациальных условий образования угольных пластов. Опасность угольных пластов представляется несущественными свойствами, а интерпретация этой опасности в виде самопроизвольного выброса газа из угольного пласта или процессов накопления и перетекания энергии в углепородном массиве закрывает разработку реальных методов прогнозирования и предотвращения этого явления.

В статье впервые сформулирована новая гипотеза газодинамических явлений при проведении горных выработок. В отличие от существующих представлений газодинамическое явление – это природное явление носит локальный характер и является реакцией напряжённо-деформированного горного массива на перемещение угольного забоя.

Методом, предотвращающим внезапный выброс метана из угольного пласта, является каптаж метана в разгрузочных скважинах с применением вакуум-насоса и вывод его по трубам в вентиляционную выработку или на поверхность. При длине разгрузочных скважин 30 м темпы проведения выработки могут быть увеличены до 13 м в сутки.

Ключевые слова: подготовительные выработки, горный удар, импульс силы, газодинамические явления, каптаж метана, углепородный массив

Благодарности: Авторы выражают благодарность горному инженеру, доктору технических наук, профессору Е.А. Колесниченко и горному инженеру, доктору технических наук В.Б. Артемьеву за полезные профессиональные замечания при подготовке статьи.

Для цитирования: Колесниченко Е.И., Колесниченко И.Е., Любомищенко Е.И. Выбор технологических параметров подготовительной выработки и локального метода предотвращения газодинамических явлений. *Горная промышленность*. 2024;(5):144–152. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-144-152>

Selection of technological parameters for a development drift and a local method to prevent gas-dynamic phenomena

E.I. Kolesnichenko✉, I.E. Kolesnichenko, E.I. Lyubomishchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

✉ Kolesnichenko-2718@rambler.ru

Abstract: The objectives of the study were to select the parameters for a development drift with account of the effect the mining operations have on formation of the gas dynamic phenomena, to develop a method of advance deformation and degassing of the coal seam, to clarify the cause-and-effect regularities in formation of the energy and dynamic interaction processes in the coal-rock massif and to justify the safe face advance criterion. The cause-and-effect method of comparing the guiding documents with the real characteristic of the outburst coal showed that the properties and attributes in the recommendations do not reflect the gas-dynamic hazard properties. Different ingredients and facies conditions of the coal seam formation have not been taken into account. The hazard of the coal seams is represented by irrelevant properties, and the interpretation of this hazard as a spontaneous gas outburst from the coal seam or the processes of energy accumulation and flow in the coal-rock massif covers the development of real methods to forecast and prevent this phenomenon.

The article for the first time ever formulates a new hypothesis of the gas-dynamic phenomena in mining workings. In contrast

to the existing concepts, the gas-dynamic phenomenon is a natural phenomenon that is local in nature and is a reaction of the stressed-and-strained rock massif to the advance of the coal face.

The method preventing a sudden outburst of methane from the coal seam is methane capture in the relief holes using a vacuum pump and its removal via pipes to the ventilation workings or to the surface. With the depth of the relief holes of 30 metres, the face advance rate can be increased up to 13 metres per day.

Keywords: development drifts, rock burst, power impulse, gas dynamic phenomena, methane capture, carbonaceous rock massif

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Mining Engineer, Doctor of Technical Sciences, Professor E.A. Kolesnichenko and Mining Engineer, Doctor of Technical Sciences V.B. Artemyev for useful professional comments during the preparation of the article.

For citation: Kolesnichenko E.I., Kolesnichenko I.E., Lyubomishchenko E.I. Selection of technological parameters for a development drift and a local method to prevent gas-dynamic phenomena. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):144–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-144-152>

Введение

Актуальность. При проведении подготовительных выработок основными технико-экономическими показателями являются подвигание забоя за цикл и количество циклов в сутки. На пластах, отнесённых к опасным по газодинамическим явлениям (ГДЯ), количество циклов в сутки ограничивается участком пласта впереди забоя, приведённым в безопасное состояние. Считается, что это состояние можно обеспечить локальными мерами для дегазации пласта и предотвращения горного удара в породах кровли¹. Первые газодинамические явления отмечены с 1834 г. в шахтах Франции, Канады, Германии, Англии, Венгрии. Они происходили с выбросом значительных объёмов метана и разрушенного угля. Аварии с выбросом метана и угля произошли в шахтах Донбасса, Кузбасса и Воркутского месторождения. Проблема предотвращения ГДЯ является сложной, так как реализация происходит на локальных участках пласта. В различных частях шахтного поля может происходить от одного до группы выбросов. Нерешённой проблема является уже 180 лет, так как предлагаемые гипотезы опровергались продолжающимися авариями, которые были квалифицированы как «внезапные выбросы угля и метана». Современная квалификация происходящих аварий в качестве «газодинамические явления» лучше отражает происходящие процессы в массиве угольного пласта и вмещающих горных пород. Произшедшие выбросы метана и угля 06.03.2020 г. на шахте «Воркутинская», 14.09.2020 г. на шахте «Чертинская-Коксовая», 22.01.2021 г. на шахте имени Тихова и 24.03.2022 г. на шахте «Осинниковская» показали, что теоретические концепции и применяемые методы предотвращения ГДЯ нуждаются в корректировке на основе появившихся новых научных знаний.

На всех вышеперечисленных шахтах работы велись в соответствии с нормативными документами². Полагаем, что причиной ГДЯ являются сложность нормативных

документов, бесполезность многих регламентирующих свойств и отсутствие представления о параметрах защищённой дегазированной зоны, а следствием – вероятность ГДЯ во время горнопроходческих работ. Отсутствуют представления о существенных свойствах угольного пласта, энергетических процессах образования метана в органических фракциях пласта и, самое главное, о параметрах и роли горного удара.

Идея заключается в том, что для внезапного выброса метана нужны два условия. Во-первых, нужно много молекул органического вещества, в основном витрена. Во-вторых, нужно много энергии для разрыва энергетических связей между атомами. После этого атомы соединяются в атомы, в том числе и в газ метан. Энергия для разрыва связей между атомами – это энергия горного удара, который происходит почти мгновенно. В результате горного удара происходит мгновенное уплотнение молекул и разрыв связи между атомами. Давление метана в пласте увеличивается и происходит выброс. Первая часть – это горный удар, вторая – выброс метана и деформированного угля.

Цель работы заключалась в выборе параметров проведения подготовительной выработки с учётом влияния горных работ на формирование газодинамических явлений, разработке метода деформирования и дегазации угольного пласта впереди забоя, в уточнении причинно-следственных закономерностей образования энергетических и динамических процессов взаимодействия в углепородном массиве и обосновании критерия безопасного подвигания забоя.

Материалы и методы

Методы исследования включали анализ федеральных Правил безопасности³, Рекомендаций по безопасному ведению горных работ⁴, Инструкции по прогнозу динамических явлений⁵, технической и образовательной литературы (см., напр. [1–5], и др.), характеризующих уровень изученности газодинамической безопасности. Для решения теоретических вопросов поставленной задачи приняты квантовые основы метанобезопасности угольных пластов [6]. Экспериментальные исследования включали

¹ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. №507 (ред. от 23.06.2022 г.); Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пласта»: приказ Ростехнадзора от 07.12.2023 г. №441; Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515; О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон от 21.07.1997 г. №116-ФЗ.

² Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. №507 (ред. от 23.06.2022 г.); Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пласта»: приказ Ростехнадзора от 07.12.2023 г. №441; Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

³ Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. №507 (ред. от 23.06.2022 г.).

⁴ Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пласта»: приказ Ростехнадзора от 07.12.2023 г. №441.

⁵ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

анализ реальных свойств и признаков угольного пласта и породного массива в зоне ГДЯ.

Объект исследования. Экспериментальные исследования включали обследование газодинамического явления с выбросом метана и угля из пласта Е-5 в забое монтажной камеры 4-1-5-8(2) ООО «Шахта «Осинниковская», произошедшего 24.03.2022 г. Анализ показал, что результаты выброса соответствуют по всем признакам газодинамическим явлениям, описанным в «Инструкции по прогнозу...»⁶.

Целью анализа является определение значимости свойств и признаков ГДЯ. Свойства – это характеристики, специфические для каждого объекта или явления. Существенные признаки – это признаки, без которых эти явления не могут быть идентифицированы. Объект и явление можно охарактеризовать существенными и (или) второстепенными признаками. Техническая литература и нормативные документы включают значительное количество различных требований и признаков. Применяемый анализ называется причинно-следственным. За 180 лет много было исследований, а аварии продолжают происходить внезапно.

Анализ свойств и признаков на месте ГДЯ покажет, какие свойства и признаки могли повлиять на предотвращение негативных процессов в угольном пласте. Например, мощность угольных пачек в пласте, пределы прочности угля и пород на сжатие невозможно установить на месте выброса. Также невозможно установить природное содержание метана в пласте, выход летучих веществ, пористость и многие другие признаки. Это несущественные признаки.

Результаты и их обсуждение

Исследования проблемы предотвращения внезапных выбросов метана и угля при разработке метаноносных угольных пластов выполнялись различными специалистами по двум научным направлениям.

Направление исследований механики горных пород и геодинамических процессов. В 1910 г. учёные Stassart и Lemaire заложили современную боязнь повышенных тектонических напряжений и геологических нарушений⁷. Эта идея является определяющей в Инструкции по прогнозу динамических явлений⁸. В России основные исследования проводили научные коллективы в ИГД им. А.А. Скочинского, ВостНИИ (Кузбасс), МакНИИ, ИПКОН РАН, МГУ (Москва), ВНИМИ (Ленинград) и др. Решению проблемы безопасности посвящены исследования учёных А.Т. Айруни, Л.Н. Быкова, Б.М. Иванова, А.М. Линькова, В.И. Николина, И.М. Петухова, А.Э. Петросяна, В.В. Ходота, Н.Н. Черницына и др.

По Л.Н. Быкову «внезапный выброс – это сочетание трех факторов: газа, структура угля и давления.носителем взрыва является свободный газ, находящийся в угленосной толще. Структура угля, под которой понимается тектоника, играет роль коллектора свободного газа. Горное давление в основном способствует разрушению

целика угля, отделяющего горную выработку от препарированной зоны» [7]. Идея Л.Н. Быкова, что определяющим фактором выбросоопасности угольных пластов являются геомеханические процессы, сделало эти выбросы «внезапными». Второе определение Л.Н. Быкова, что «образование метана, находящегося в угленосной толще, является следствием метаморфизма», авторы считают верным. Исследования по решению проблемы предотвращения выбросов метана и угля при проведении горных выработок были сосредоточены в основном на изучении «внезапных» геодинамических процессов в напряжённо-деформированном массиве. Условие возбуждения выброса в подготовительной выработке В.В. Ходот представил в виде уравнения $W > F + U$. Силовое явление выброса может произойти, если потенциальная энергия угля W будет больше суммы работы на смещение угля в сторону выработки F и работы на разрушение угля U [8]. Решить это неравенство нельзя, так как все слагаемые несущественны и неизвестны. В этом неравенстве главным признаком является потенциальная энергия угля W , которая зависит от структуры угольного пласта, а не от напряжённо-деформированного (геомеханического) состояния массива. В современной публикации «угольный пласт представляет блочную среду, фильтрация газа в которой идёт по трещинам кливажа. Размеры блоков, содержащих основную часть метана, составляют единицы миллиметров, реже – несколько сантиметров, а их проницаемость – пренебрежительно мала» [9]. Угольный пласт рассматривается как однородный материал, имеющий постоянные структурно-механические свойства: прочность, упругость, пластичность, трещиноватость. Предпосылки разрушения пласта при внезапном выбросе рассматриваются с позиций механики сплошных сред. Такое качественное представление структуры угольных пластов противоречит экспериментальным исследованиям петрографических типов углей и их структурно-вещественного состава. Нормативные документы многие годы были составлены на основе представлений исследователей геодинамического направления⁹.

Направление исследования природных геологических закономерностей формирования угольных пластов. В 1897 г. Д.И. Менделеев сформулировал представление о молекулярной структуре метаморфизованного угля. Представил расчёт массовой концентрации химических элементов углерода С, водорода Н, серы S и кислорода О. Изучение структуры угольных пластов продолжили учёные Ю.А. Жемчужников, Г.А. Иванов, И.Э. Вальц, М.В. Богданова и др. [10–13]. Установили закономерности формирования торфяника и влияние геотектонических ритмов, аэробных и анаэробных условий на образование петрографических типов угля [11]. Существенной геологической закономерностью является влияние восстановленности угля на химическую характеристику угольного вещества [13]. В.Е. Ханин обосновал образование различных фаций в пластах, которые являются «отражением физико-географических и геотектонических условий осадка и преемственности его компонентов в составе горной породы» [14]. Совокупные результаты этих исследований составили объективную характеристику

⁶ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

⁷ Stassart et Lemaire. Les déagements instantanés de grisou dans les mines de houille de Belgique. t.15, livr. 4, 1910.

⁸ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

⁹ Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пластов»: приказ Ростехнадзора от 07.12.2023 г. №441; Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515; Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа. М.: Недра; 1977. 159 с.

структуры угольного вещества. Современные результаты исследования геолого-генетических свойств и признаков и их влияние на метаноносность угольных пластов приведены в публикациях [2; 6; 15].

Угольные пласты состоят из различных ингредиентов. По блеску угли различают блестящие (клареновые), полублестящие (дюреноклареновые), полуматовые (кларенодюреновые), матовые (дюреновые). Структурно-вещественный состав характеризуется содержанием в угольном веществе витрена. Угольные пласты отражают различные фациальные условия во время отложения торфяника. Это разнообразие фациальных условий зависело от фауны и флоры, уровня грунтовых вод, расстояния от водного горизонта.

Основными компонентами угля, опасного по внезапным выбросам, являются литотипы витрен и фюзен, а также глинистые минеральные включения. Витрен представляет собой части угля, которые имеют резкую границу с другими ингредиентами, легко отделяются от них и прорезывает вертикальные трещины. При крепких породах непосредственной и основной кровли горное давление передается на окружающие участки пласта с меньшим содержанием витринита. Прочность его зависит от степени восстановления. Более восстановленный имеет меньшую прочность и образуется в щелочной среде при быстром покрытии водой. Фюзен имеет волокнистое строение, хрупок и легко разрушается при механической нагрузке. Структура фюзена клеточная, причем клеточные отверстия могут быть заполнены минеральной массой или метаном. Фюзинит хорошо сорбирует метан и углекислый газ. Наибольшую опасность представляют непрочные полублестящие или полуматовые зернистые слои угля, сложенные линзами витрена и фюзена с размерами от 0,5 до 3 мм. Так называемый «сажистый уголь» в опасных местах состоит из фюзинитового дюрена и кларено-дюрена с содержанием фюзена от 40 до 60%.

Для прогнозирования выбросоопасных зон основным является вопрос о её природе. Если считать, что образование выбросоопасного участка зависело от аномальной структуры и фациальных условий торфонакопления угольного вещества [2], то геологи смогут идентифицировать расположение этих участков в пределах шахтного поля и угольного месторождения.

Проектные свойства пласта и пород на участке внезапного выброса метана и угля. В шахтном поле мощность угольного пласта Е-5 изменяется от 2,16 до 4,20 м. Пласт Е-5 сложного строения марки Ж. Полная мощность пласта в пределах выемочного участка 4-1-5-8 (1) относительно выдержанная и колеблется от 2,60 до 3,50 м, при среднем значении 2,80 м. Состоит из двух угольных пачек, разделенных прослойком слабого, трещиноватого алевролита. Средняя мощность прослойка колеблется от 0,05 до 0,10 м, при среднем значении 0,07 м. Выход летучих 32,1%. Зольность чистого угля 8,4%, с учетом засорения внутрипластовым прослойком и «колчеданами» 28,8–35%. Мощность верхней пачки в среднем составляет 1,20 м, нижней 1,70 м.

Сопротивление на сжатие верхней и нижней пачки от 8 до 11 МПа. Газоносность более 25 м³/т на горизонте –600 м. В блоке №1 угольный пласт отнесён к опасным по внезапным выбросам угля с глубины 650 м.

Непосредственная кровля средней мощностью от 5 до 9 м, сложена алевролитом, а на участках, где породы интенсивно трещиноватые, – неустойчивая.

Выше залегают прочные мелкозернистые песчаники и

крупнозернистые алевролиты. Возможно отслоение угля в массиве (целике) в сторону выработанного пространства, сопровождающееся его постепенным разрушением. Отслоение происходит под действием опорного давления в краевой части пласта. Основная кровля средней мощностью 11,3–17 м сложена алевролитом.

Свойства угольного пласта в месте выброса и достоверность их определения. Эти свойства представлены в документации, характеризующей угольный пласт в месте выброса. Необходимо отметить, что мощность верхней пачки угля уменьшилась до 1,07 м, а нижней пачки увеличилась до 1,78 м. Мощность алевролитового прослойка 0,07 м. Однако этот минимум свойств на месте выброса не может быть достоверным не только в призабойной зоне пласта, но и в массиве впереди забоя. Эти свойства могут быть использованы для математического моделирования, но как показатели выбросоопасности пласта они несущественны.

Анализ достоверности определения свойств угля в пласте. Для визуализации объектов получения свойств показаны фотографии фрагментов реальных поверхностей угольного пласта в забое выработки (рис. 1, а, б). Видна сложность структурного строения пласта. Границы слоёв в пласте нечёткие. Невозможно взять пробы или выполнить измерения. Измерение прочности угольных слоёв производится прочностномером П-1 (рис. 1, в). Прибор из семейства античных арбалетов копирует принцип Роквелла, применяемого для измерения твёрдости металлов и сплавов по глубине внедрения индикатора. Прочность углей измеряется по глубине внедрения конусного наконечника длиной 0,1 м в угольный массив (рис. 1, в). Полагаем, что пробы на анализ выхода летучих веществ, пористости, проницаемости и др. также не будут отражать свойства всего пласта. Возможно, что эти несущественные свойства и не нужны в нормативных документах.

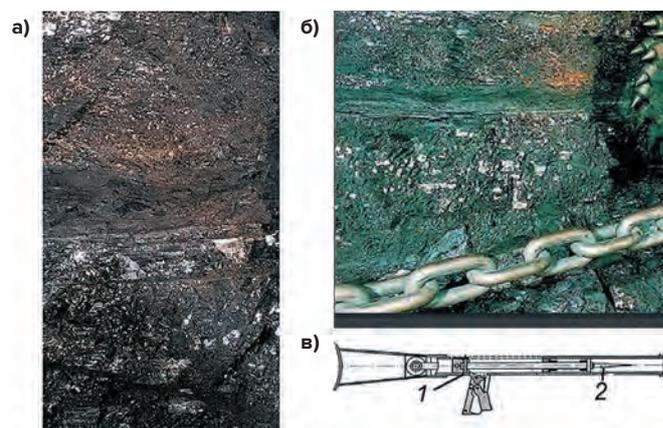


Рис. 1
Рис. 1. Фотографии фрагментов поверхности забоя угольного пласта и используемого в соответствии с нормативными документами устройства для определения механической прочности угля:
а, б – фрагменты в различных частях поверхности забоя;
в – схема прочностномера П-1;
1 – механизм силового воздействия на пласт;
2 – конусный наконечник прочностномера длиной 0,1 м

Fig. 1
Photographic images of fragments of the coal seam face surface and the device used in compliance with the normative documents to determine the mechanical strength of coal:
а, б – fragments in different parts of the face surface;
в – schematics of the P-1 strength measuring device;
1 – mechanism of the power impact on the seam;
2 – cone tip of the strength measuring device with the length of 0.1 m

Параметры разрушения угольного пласта в результате газодинамического явления. Параметры разрушения угольного пласта соответствуют отличительным признакам выбросов, представленных в Инструкции ¹⁰. В забойной части пласта образовалась полость глубиной около 8 м и шириной 12 м с распространением в левую сторону (рис. 2). Фактическая ширина выработки уменьшилась от 5 до 4,2 м. Высота выработки у забоя снизилась с 3,8 до 2,7 м. Комбайн отодвинут от забоя на 5 м и развёрнут от оси выработки.

Таким образом, параметры полости чётко очерчивают границы выбросоопасного участка в верхнем слое. Не представляется возможным установить на участке выброса отличие таких свойств, как прочность, зольность, выход летучих, пористость, проницаемость, от соседних участков, не затронутых выбросом. Поэтому эти свойства угля не являются существенными для характеристики выбросоопасности пласта.

Меры в месте выброса для прогнозирования выбросоопасности и горного удара. Прогноз выбросоопасности при проведении монтажной камеры выполняли бурением двух прогнозных шпуров длиной не менее 5,5 м с интервалом не более чем через 4 м подвигания забоя. Прогноз удароопасности выполняли с периодичностью не более чем через 2 м подвигания забоя. При ширине выработки 5 м бурили 7 прогнозных шпуров. Из них 4 шпура длиной 8 м бурили в борта выработки (по два в каждый), а три шпура длиной 9 м – в грудь забоя. Анализ этих параметров показывает, что они не могут ни прогнозировать, ни предотвратить динамические явления в пласте.



Рис. 2
Фото образовавшейся полости в пласте монтажной камеры 4-1-5-8(2) после выброса метана и угля 01.04.2022 г.

Fig. 2
A photographic image of a cavity formed in the formation of Installation Chamber 4-1-5-8(2) after a methane and coal outburst on 01.04.2022

Новая гипотеза газодинамических явлений (ГДЯ) при проведении горных выработок. Аварии показали отсутствие представлений о ГДЯ в рекомендациях по их предотвращению и в научных публикациях. В Инструкции

по прогнозу ДЯ ¹¹ выделяются пласты, опасные по горным ударам и внезапным выбросам. В ГОСТ Р 58150–2018 ¹² дано такое определение газодинамическому явлению: ГДЯ – это самопроизвольный выброс газа из призабойной зоны массива, сопровождающийся динамическим эффектом (п. 20). В п. 38 приводится, что динамическое явление – это проявление горного давления сил гравитации, заключающееся во внезапном разрушении угля. В п. 40 расшифровывается, что ГДЯ в шахтах – это результат обмена энергией в блочном массиве горных пород. Второе явление, горный удар, характеризуется в п. 48 как внезапное в виде взрыва разрушение отдельных, предельно напряжённых участков угольного массива. В учебном пособии Е.Н. Чемезова [3] горный удар – это разрушение, т.е. следствие процесса удара. В публикациях также поддерживается мнение некоторых исследователей о том, что в углеродном массиве происходят процессы обмена, накопления и освобождения энергии. Такая интерпретация процессов в углеродном массиве не соответствует единицам измерения энергии и работы, в основе которых заключена сила, единицей измерения которой принят ньютон. Трудно визуализировать процессы обмена энергией в углеродном массиве.

Разберём, что такое удар на примере кузнечного процесса обработки заготовки из металла. Удар состоит из трёх фаз движения молота: поднимается вверх; опускается вниз; ударяет по заготовке. Сила удара зависит прямо пропорционально от массы и ускорения молота при приближении к заготовке. Авторы полагают, что в основе горного удара лежит ударное взаимодействие вышележащих пластов кровли по угольному пласту.

Подземные горные работы являются причиной образования горного удара. Выемка угольного пласта нарушает естественное состояние массива пород вокруг выработки. Различают первое, первичное и вторичное обрушение породного массива. Образование свода обрушения происходит в виде последовательного отделения нижележащих от вышележащих слоев и их прогиба по нормали к напластованию подобно плитам, защемленным по контуру, или балкам. Сущность гипотезы консольной балки состоит в том, что породные слои над выработанным пространством рассматриваются как балки, заделанные одним концом в целик. Такие консольные балки образуются в результате подвигания забоя подготовительной выработки. Г. Вебером в 1914 г. была высказана гипотеза волны давления исходя из наблюдений за деформациями крепи и боковых пород в подготовительных выработках (штреках) ¹³. В.С. Бригида и Н.Н. Зинченко показывают, что волны давления Вебера в виде пустот образуются при подработке породных слоев кровли, достаточно прочной на изгиб [16].

Явление горного удара происходит после увеличения длины консоли основной кровли на критическую длину. Происходит облом консоли, опорное давление, которое было на консоли, мгновенно перемещается в сторону пустоты Вебера, происходит мгновенное выпрямление пласта основной кровли и мгновенный удар всей массой вышележащих слоев массива по угольному пласту. По определе-

¹¹ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

¹² ГОСТ Р 58150-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения (утв. и введ. в действие Приказом Росстандарта от 05.06.2018 №312-ст).

¹³ Напряженно-деформированное состояние породного массива вокруг очистных выработок. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6211391/page/2/> (дата обращения: 08.08.2024).

нию М.В. Лейбовича «сила, действующая на материальную точку за малое время удара и достигающая достаточно больших значений, называется ударной силой» [17]. Эта сила и называется горным ударом, происходящим с большой скоростью.

Таким образом, горный удар является сопутствующей реакцией напряжённо-деформированных слоёв кровли на перемещение угольного забоя. Для определения параметров горного удара рассмотрим пример математического моделирования волны Вебера, приведённый в работе [18]. Для предотвращения внезапного выброса применяли скважины длиной от 10 до 20 м в соответствии с действующей в то время Инструкцией РД 05-350-00. Для примера принимаем скважины длиной 20 м. Реальная амплитуда кровли при длине скважин длиной 20 м составила 0,047 м. Авторами для расчёта параметров удара разработан алгоритм, который будет представлен в следующей статье. При средней плотности пород горного массива 2500 кг/м^3 горное давление на угольный пласт в естественных условиях равно $14,72 \text{ МПа}$. Предел прочности на сжатие в массиве угольного пласта от 5 до 15 МПа, при одноосном сжатии $0,50 \text{ МПа}$. Динамическое давление горного удара равно $132,54 \text{ МПа}$, что в 9 раз превышает прочность пласта в массиве и в 265 раз прочность при одноосном сжатии. В работе [19] авторы приводят результаты моделирования обрушения консольной балки основной кровли. Длина консоли повышает величину опорного давления в краевой части пласта. После обрушения консоли пород кровли «пик напряжения перемещается глубоко в угольный массив» [19].

Горный удар – это природное явление при проведении горной выработки, действие которого невозможно исключить, но необходимо уменьшить его опасность и влияние на темпы проведения выработки. В соответствии с рекомендациями Инструкции¹⁴ принимаем бурение скважин с веерным расположением в горизонтальной плоскости, чтобы уменьшить прочность пласта впереди забоя и в боковых бортах шириной B (рис. 3, а).

Проблема заключается в определении реальной ширины целика, которая является границей зоны активной деформации угольного пласта. Важность этого параметра состоит в том, что он является одновременно показателем снижения силы горного удара и дегазации метана в зоне, равной количеству циклов по выемке угля. Длина реально деформированного пласта впереди забоя, назовём её критерием дегазации пласта, может быть определена двумя способами. Первый способ заключается в математическом моделировании процессов деформации. Опыт моделирования представлен в работе [18]. Замеренные в шахте параметры критерия приведены авторами работ¹⁵ [15]. На практике длину деформированного целика можно определить бурением контрольной скважины по целику. Такие скважины на шахтах Воркуты показали, что дегазирование целика ограничивалось расстоянием 1,2 м между соседними скважинами.

Рассмотрим влияние длины дегазационных скважин на параметры деформирования и дегазации пласта (рис. 3, б). Из условия подобия треугольников $\Delta XRK \sim \Delta XPS$ принимаем $RK/XK = PS/XS$, но $XK = L_p$, а $XS = L$. Определяем параметры

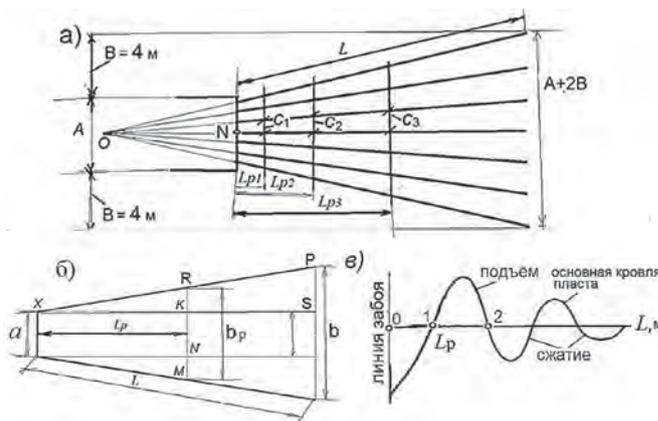


Рис. 3
Схемы проведения разгрузочных скважин и определения параметров напряжённо-деформированной зоны в угольном пласте:
а – пространственная схема;
б – расчётная схема;
в – схема волнового процесса по Веберу;
L – длина скважин в веере;
Lp – длина деформированного участка впереди забоя;
bp – максимальная ширина деформированного целика

Fig. 3
Schematics of drilling relief boreholes and determining the stress-and-strain zone parameters in the coal seam:
а – a spatial layout;
б – a calculation layout;
в – a schematic representation of the wave process by Weber;
L – borehole depths with a fan;
Lp – length of the deformed area ahead of the face;
bp – the maximum width of the deformed pillar

целика: $a = A / (n - 1)$; $b = (A + 2B) / (n - 1)$, где n – количество скважин в веере, B – ширина боковых бортов разгрузки пласта скважинами. После упрощения формул получаем $L_p = 0,5 \sim L (b_p - a) / (b - a)$. Расчёты показали (табл. 1), что приемлемые темпы подвигания выработки могут обеспечить 7 разгрузочных скважин длиной 20 и 30 м.

Таблица 1
Таблица расчётных значений длины деформированного участка пласта

Table 1.
Table of the calculated length values of the deformed section of the seam

Номер варианта, N	n	L, м	Длина деформированного целика, Lp, м		
			bp = 1,25 м	bp = 1,5 м	bp = 2,0 м
1	5	10	–	0,63	1,9
2	5	15	–	0,95	2,8
3	5	30	–	1,9	5,64
4	7	15	2,36	3,75	6,6
5	7	20	3,14	5,0	8,74
6	7	30	4,71	7,5	13,1

Анализ показал, что с увеличением длины скважин горный удар смещается от забоя, а площадь действия его уменьшается (рис. 3, в). Горный удар по нарушенному скважинами массиву пласта получается неупругим, и сила удара значительно снижается. Аналогом явления является применение мягких матов для смягчения удара при приземлении спортсменов.

¹⁴ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515, п. 160, 166, 167.

¹⁵ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» от 10.12.2020 г. №515.

Анализ парадигмы природных представлений о молекулярной структуре метаморфизованных углей показывает, что внезапный выброс метана и угля без горного удара маловероятен. Однако и спокойное выделение метана может нарушать безопасность работ во время процесса выемки угля.

Авторы рекомендуют способ активного улавливания газа в разгрузочных скважинах (рис. 4). Этот способ рекомендует также ГОСТ Р 58150–2018 (п. 113). Способ реализуется улавливанием газа в разгрузочных скважинах с помощью вакуум-насоса и выводом его по трубам в вентиляционную выработку или на поверхность.

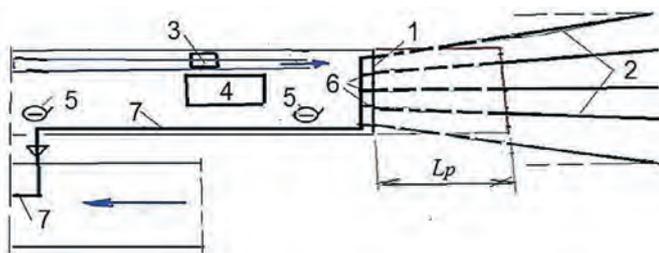


Рис. 4
Схема каптажа метана в разгрузочных скважинах впереди забоя подготовительной выработки с применением вакуум-насоса:
1 – забой выработки;
2 – разгрузочные скважины;
3 – буровой станок;
4 – проходческий комбайн;
5 – датчик концентрации метана (2%);
6 – кондуктор противовыбросовый (герметизирующее устьевое оборудование);
7 – вентиляционная выработка;
 L_p – длина деформированного и дегазированного участка пласта для выемки угля

Fig. 4
Schematic representation of methane capture in the relief holes ahead of the face of a development drift using a vacuum pump:
1 – mine face;
2 – relief boreholes;
3 – drill rig;
4 – roadheader;
5 – methane concentration sensor (2%);
6 – blowout preventing collar sleeve (drilling control hookup);
7 – ventilation workings;
 L_p – length of the deformed and degassed seam section for coal excavation

Вывод. Этот способ позволит увеличить темпы проведения выработки до 8,74 м при длине скважин 20 м (см. табл. 1). А при длине скважин 30 – до 13,1 м (в 1,75 раза). Изолированный отвод метана предотвращает условия для внезапного выброса, повышения концентрации и взрыва метана в выработке.

Заключение

Установлено, что технологические параметры подготовительной выработки на угольных пластах, отнесённых к опасным по газодинамическим явлениям, необходимо принимать с учётом установленных причинно-следственных условий в зоне горных работ. Результаты анализа объективных характеристик произошедшего газодинамического явления с разрушением пласта и выбросом метана и угля позволяют сделать вывод, что были реализованы два явления: силовой удар кровлей по пласту, в результате которого деформируется слой угля, в котором резко увеличиваются концентрация и давление метана. Принятый метод причинно-следственного анализа показал, что парадигма прогноза газодинамических явлений и рекомендации по безопасному ведению

горных работ рекомендуют несущественные признаки и свойства, которые усложняют технологические работы. Принятое определение газодинамического явления как результат обмена энергией в массиве горных пород не предполагает способов его прогноза и предотвращения.

Научная новизна. Впервые сформулирована новая гипотеза газодинамических явлений при проведении горных выработок. В отличие от существующих представлений считаем, что газодинамическое явление – это природное явление носит локальный характер и является реакцией напряжённо-деформированного горного массива на перемещение угольного забоя.

Установлена закономерность природного газодинамического явления от цикличности обрушения консолей основной кровли угольного пласта. Газодинамическое явление состоит из двух самостоятельных явлений: динамического явления в кровле пласта и газодинамического явления в угольном пласте. Причиной динамического явления являются прогиб кровли над угольным пластом и последующий облом образовавшихся консольных балок основной кровли. Динамическое явление – это импульс силы мгновенного горного удара всей массой вышележащих слоёв кровли с большим ускорением по угольному пласту.

Сила и площадь взаимодействия горного удара с пластом зависят от изгибающих свойств и прочности основной кровли. Разработаны алгоритмы расчёта импульса силы горного удара и параметров деформированного участка пласта в оконтуренной зоне разгрузочными скважинами.

Впервые применён метод классификации, заключающийся в анализе парадигмы на существенные и несущественные свойства и признаки газодинамических явлений и внезапных выбросов метана и угля с точки зрения их влияния на предотвращение и возможность подтверждения произошедшего негативного явления. Оказалось, что действующие нормативные документы содержат в основном несущественные признаки.

Теоретическая значимость заключается в приращении знаний о причинах и условиях газодинамических процессов при разработке метаноносных угольных пластов. Дано представление о горном ударе как о мгновенном ударе импульса сил вышележащих горных пород по угольному пласту, в результате которого происходит деформация угольного пласта.

Практическая значимость. Методом, предотвращающим внезапный выброс метана из угольного пласта, является каптаж метана в разгрузочных скважинах с применением вакуум-насоса и вывод его по трубам в вентиляционную выработку или на поверхность.

Критерием эффективности деформирования и дегазирования угольного пласта на величину темпов проведения выработки принята граница изменения прочности пласта от одноосного к объёмному сжатию. При длине разгрузочных скважин 30 м темпы проведения выработки могут быть увеличены до 13 м в сутки.

При реализации способа каптажа отпадает необходимость в районировании и отнесении угольных пластов к опасным по газодинамическим явлениям, так как подземные горные работы являются причиной образования газодинамического явления. Внезапность этого явления зависит от контролируемого процесса опускания кровли в отжатой зоне пласта и цикличности обрушения консолей основной кровли.

Список литературы / References

1. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И., Колесниченко Е.И. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(1):108–120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>
Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., Kolesnichenko E.I. Mechanism of methane outbursting in coal seams. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(1):108–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>
2. Колесниченко Е.А. *Управление газодинамическим состоянием выбросоопасного пласта при проведении выработок с учётом генетических характеристик месторождения: автореф. ... д-ра техн. наук*. М.; 2000. 40 с.
3. Чемезов Е.Н. *Безопасность подземных горных работ*. Якутск: СВФУ; 2010. 359 с.
4. Полевщиков Г.Я. «Деформационно-волновые» процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(5):50–60.
Polevshchikov G.Ya. Deformation-wave processes under production face advance in coal and rocks. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2013;(5):50–60. (In Russ.)
5. Лис С.Н. Результаты исследований волнового характера опорного давления целиков и краевых частей угольных пластов. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):39–48. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-39-48>
Lis S.N. Findings of studies on wave character of pillar support pressure and edge parts of coal seams. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):39–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-39-48>
6. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И., Колесниченко Е.И. Квантовые основы метаноопасности угольных пластов. *Горная промышленность*. 2021;(1):91–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-91-97>
Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., Kolesnichenko E.I. Quantum fundamentals of coal bed methane hazards. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):91–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-91-97>
7. Захаров Е.И., Лавит И.М., Чеботарев П.Н. Природа внезапных выбросов. к 120-летию со дня рождения Л.Н. Быкова. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016;(3):99–108.
Zakharov E.I., Lavit I.M., Chebotarev P.N. Nature of sudden outbursts. the 120th anniversary of the Professor Leonid Bikov. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2016;(3):99–108. (In Russ.)
8. Ходот В.В. *Современные представления о природе и механизме внезапных выбросов угля и газа*. М.: Углетехиздат; 1952.
9. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Рыбалкин Л.А. Оценка снижения риска подземной разработки газоносных угольных пластов при использовании гидроразрыва. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;2(5):3–11. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-5-3-11>
Serdyukov S.V., Shilova T.V., Rybalkin L.A. Risk reduction estimation for underground mining of gas-contained coal seams while using the hydraulic fracturing. *Interekspo Geo-Sibir*. 2019;2(5):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-5-3-11>
10. Жемчужников Ю.А. *Общая геология каустобиолитов*. Л.; М.: Гл. ред. геологоразвед. и геодез. лит-ры; 1935. 548 с.
11. Иванов Г.А. *Угленосные формации. (Закономерности строения, образования, изменения и генетическая классификация)*. Л.: Наука; 1967. 407 с.
12. Вальц И.Э. Первичные и диагенетические изменения микроструктуры растительного материала на торфяной и бурогольной стадиях. В кн.: Иванов Г.А., Погребницкий Е.О. (ред.) *Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород*. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние; 1968. С. 15–25.
13. Богданова М.В. Закономерности изменения бурых углей Украины в процессе углефикации. В кн.: Иванов Г.А., Погребницкий Е.О. (ред.) *Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород*. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние; 1968. С. 25–36.
14. Ханин В.Е. О некоторых основных понятиях в учении о фациях и формациях. *Бюллетень МОИП*. 1950;25(6).
15. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Артемьев В.Б., Любомищенко Е.И., Черечукин В.Г., Колесниченко Е.И. *Квантовая теория метанобезопасности. Электронно-энергетические процессы в молекулярных системах*. LAP LAMBERT Academic Publishing RU; 2021. 473 с.
16. Бригида В.С., Зинченко Н.Н. Особенности метановыделения из дегазационных скважин впереди очистного забоя. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(1):69–74.
Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. *Journal of Mining Science*. 2014;50(1):60–64. <https://doi.org/10.1134/S1062739114010098>

17. Лейбович М.В. *Теория удара в задачах и примерах*. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та; 2016. 236 с.
18. Колесниченко Е.А., Колесниченко И.Е. *Внезапные выбросы и взрывы метана: прогнозирование и предотвращение*. Ростов-на-Дону: Логос; 2005. 248 с.
19. Ле К.Ф., Дмитриев П.Н., Тхан В.З., Ли Ю. Влияние основной кровли на параметры зоны опорного давления в краевой части пласта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-1):68–82. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_68
Le Q.Ph., Dmitriev P.N., Than V.D., Li Yu. Influence of the main roof on the parameters of the abutment pressure zone in the selvedge of the seam. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-1):68–82. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_68

Информация об авторах

Колесниченко Евгений Игоревич – аспирант кафедры горное дело, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8740-9356>; e-mail: z_kolesnichenko@mail.ru

Колесниченко Игорь Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и строительства автомобильных дорог, заместитель директора – научный руководитель Шахтинского автодорожного института (филиала), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1063-5304>; e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru

Любомищенко Екатерина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и строительства автомобильных дорог Шахтинского автодорожного института (филиала), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9495-7385>; e-mail: katya87lk@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.07.2024

Поступила после рецензирования: 27.08.2024

Принята к публикации: 11.09.2024

Information about the authors

Evgeny I. Kolesnichenko – Postgraduate Student, Mining Department, Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8740-9356>; e-mail: z_kolesnichenko@mail.ru

Igor E. Kolesnichenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Construction and Technogenic Safety Department, Deputy Director – Academic Advisor, Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1063-5304>; e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru

Ekaterina I. Lyubomishchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Assistant Professor at the Motor Road Design and Construction Department, Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9495-7385>; e-mail: katya87lk@mail.ru

Article info

Received: 07.07.2024

Revised: 27.08.2024

Accepted: 11.09.2024