

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ УГЛЕЙ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ

П.В. Гречишкин¹, К.В. Соколов², С.А. Малова³

¹ Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр «ВНИМИ»», Кемерово, Россия, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

² ООО «ММК-Уголь», Белово, Россия

³ НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация: Изложены результаты исследований по механике разрушения углей выбросоопасных пластов и их диспергирования при внезапных выбросах угля и газа. Выполнено исследование проб угля, разрушенного при внезапных выбросах, в лабораторных условиях. Рассмотрены общие закономерности диспергирования углей и функции распределения угольных частиц по крупности. Предложена методика определения показателей энергоемкости разрушения углей с использованием модификации на основе законов Риттингера и Чарльза. Полученное уравнение является основным уравнением, определяющим зависимость линейных размеров образующихся при разрушении частиц от затраченной удельной работы A и механических свойств материала R (т.е. выражает закон дробления). На эмпирической основе выявлена закономерность функции распределения частиц раздробленного малопрочного угля. Угли различной степени нарушенности (от I до V) на порядок величин различаются по коэффициенту крепости по толчению при близких значениях приведенного радиуса и описываются одной и той же кумулятивной кривой. Выполнено исследование энергоемкости разрушения углей при внезапных выбросах угля и газа на пробах угля, взятых из разрушенной при выбросах угольной массы. Распределение угольных частиц по крупности при разрушении угля в виде внезапного выброса ничем не отличается от распределения частиц при механическом дроблении. Исследование показало, что в энергетическом отношении диспергирование углей выбросоопасных пластов имеет более сложную природу, что вызвано нарушенностью углей, неравномерным распределением и различной степенью раскрытия трещин в угольном материале.

Ключевые слова: внезапные выбросы угля и газа, диспергирование углей, выбросоопасные пласты, нарушенный уголь, прочность угля, энергоемкость разрушения, законы дробления, выбросоопасность.

Для цитирования: Гречишкин П. В., Соколов К. В., Малова С. А. Закономерность диспергирования углей при внезапных выбросах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12. – С. 18–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_18.

Pulverization patterns of coal from outbursts

P.V. Grechishkin¹, K.V. Sokolov¹, S.A. Malova¹

¹ Kemerovo branch of JSC Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying – Interdisciplinary Scientific Center «VNIMI», Kemerovo, Russia, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

² MMK-Ugol LLC, Belovo, Russia

³ NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract: The article presents the studies on fracture mechanics of outburst-hazardous coal and on coal pulverization from coal and gas outbursts. The coal samples fractured in outbursts are analyzed at a lab scale. The regular patterns of coal pulverization and coal particle-size distributions are discussed. A procedure is proposed to determine energy input of coal fracture using a modification of Von Rittinger's and Charles's laws. The obtained equation is a basic equation defining dependence of linear sizes of fractured particles on the specific work input A and on the mechanical properties of material R (i.e. expression of a law of crushing). The behavior of the distribution function of weak crushed coal particles is revealed empirically. Coals of different damage categories (from I to V) differ by an order of magnitude in crushability at close values of the equivalent radius and are described by the same cumulative curve. The energy input of coal fracture from coal and gas outbursts was investigated on outburst coal samples. The particle-size distribution in coal fracture from outbursts has no difference from the particle-size distribution of coal after mechanical crushing. The investigations show that in terms of energy, pulverization of outburst-hazardous coal has a more complex nature, which is due to the damage ratio of coal, nonuniform distribution of cracks and their different-size opening in coal.

Key words: coal and gas outbursts, coal pulverization, outburst-hazardous seams, damaged coal, coal strength, fracture energy input, laws of crushing, outburst hazard.

For citation: Grechishkin P. V., Sokolov K. V., Malova S. A. Pulverization patterns of coal from outbursts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12):18-28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_18.

Введение

Решение проблемы внезапных выбросов угля и газа, несмотря на многочисленные исследования, по-прежнему остается актуальным. Природа внезапных выбросов на угольных шахтах до конца не выяснена, применяемые способы борьбы с выбросами и методы прогноза выбросоопасности не обладают соответствующей надежностью [1–4]. Это предопределяет необходимость дальнейших исследований в этой области.

Известно, что внезапный выброс угля и газа представляет собой процесс превращения более или менее сплошного твердого тела (пласта) в сыпучую массу, т.е. здесь, в сущности, имеет место случай разрушения угля с высокой степенью его диспергирования.

Одним из основных факторов выбросоопасности пласта являются механические свойства углей, при этом газодинамические явления в большинстве

случаев приурочены к углям с пониженной прочностью. Это обстоятельство широко используется в методах прогноза выбросоопасности угольного пласта. Механические свойства углей определяют и энергоемкость их разрушения при внезапных выбросах. Существенное влияние на эти свойства оказывает содержание в углях воды и газа. Следовательно, энергоемкость разрушений углей и, в конечном счете, степень диспергирования углей при внезапных выбросах должны зависеть от газо- и водонасыщения угольных пластов [5].

К сожалению, в настоящее время не проводится систематическое исследование разрушенного при внезапных выбросах угля. В горнотехнической литературе имеются ограниченные данные о гранулометрическом составе выброшенных углей, хотя такие данные были бы полезны для понимания природы внезапных выбросов.

Способы борьбы с выбросами почти во всех случаях в той или иной мере направлены на изменение механических свойств угля и энергоемкости разрушения пласта [6]. Поэтому данные об энергоемкости разрушения углей и о влиянии на энергоемкость различных воздействий на пласт необходимы для усовершенствования способов борьбы с выбросами и повышения их надежности.

Исследования проб угля, разрушенного при внезапных выбросах

В работе [7] пробы угля, разрушенного при внезапных выбросах и различными способами в лабораторных и шахтных условиях, подвергались изучению под микроскопом с увеличением до 100 крат с целью выявления формы частиц. В пробах выделяли частицы, имеющие кубическую форму, продолговатую форму, характеризующуюся отношением минимального диаметра к максимальному 1:2, и плоские частицы — с отношением диаметров 1:3. Содержание частиц в пробах определяли отдельно для каждой из 8 фракций от $d < 1$ см до $0,05 > d > 0,025$ см. Распределение частиц по форме для более мелких фракций изучить не удалось, так как эти частицы агрегировались.

Для оценки объективности такого визуального способа определения формы частиц проведены специальные опыты. Из одного куска угля приготовляли навески, которые разрушали в одинаковых условиях. Затем делалось определение формы частиц для каждой из навесок. Оказалось, что выход частиц одинаковых форм в каждой из навесок не отличается более чем на 5%, это свидетельствует о достаточной надежности принятого способа определения формы частиц.

Важнейшей характеристикой разрушения является площадь вновь образу-

емой поверхности частиц. Из геометрических соображений общая площадь (S , см²) поверхности частиц сферической или кубической формы определяется формулой

$$S = 3V/r \quad (1)$$

где V — объем частиц, см³; r — радиус частиц, см.

С учетом фактических линейных размеров угольных частиц призматической формы площадь образующихся при дроблении угля поверхностей уменьшается на 6% по сравнению с площадью частиц сферической или кубической формы. Поэтому все образующиеся при разрушении частицы при определении вновь образующейся поверхности можно считать имеющими сферическую или кубическую форму, а размеры частиц можно оценивать их диаметром или радиусом, не допуская при этом существенной погрешности [7, 8].

Как известно, универсальный закон дробления твердых тел, одинаково хорошо определяющий крупность частиц продуктов дробления в зависимости от затраченной работы для различных по своим физическим свойствам тел и при различных степенях диспергирования, в настоящее время отсутствует [9, 10]. Для различных же частных случаев получен ряд эмпирических законов дробления (законы Риттингера, Бонда, Кика и др.), которые формально вытекают, как показано в работе [11], из формулы Чарльза [12].

В наиболее общей форме известные законы дробления можно представить в виде формулы

$$A_0 = a'S_2^\alpha - a'S_1^\alpha, \quad (2)$$

где A_0 — затраченная на разрушение материала работа (приращение работы), Дж; S_1, S_2 — начальная и конечная суммарные поверхности частиц разрушенного материала, см²; α — показатель степени; a' — коэффициент пропорциональности.

Все законы дробления основаны на наличии определенной связи между затраченной работой и приращением суммарной площади поверхности частиц. Лишь закон Риттингера предполагает прямую пропорциональность приращения поверхности ΔS затраченной работе A_0 (показатель степени $\alpha = 1$), остальным законам соответствуют более сложные формы связи ($\alpha \neq 1$).

Поскольку результаты дисперсионных анализов дают значения диаметров (радиусов) частиц, удобнее в расчетах не пользоваться площадями частиц, а определять приведенные радиусы частиц разрушаемого материала. В работе [13] предложена зависимость для определения приращения работы, затраченной на разрушение материала:

$$A_0 = a' \left(1 / r_{n2}^\alpha - 1 / r_{n1}^\alpha \right) * (3V)^\alpha, \quad (3)$$

где r_{n1} , r_{n2} — начальный и конечный приведенные радиусы частиц разрушаемого материала соответственно.

В абсолютном большинстве случаев значение r_{n2} на несколько порядков величин меньше r_{n1} , поэтому значением r_{n1} можно пренебречь. Соответственно, в опытах по дроблению материалов начальные размеры кусков материала можно не учитывать. Тогда, переходя к удельной (на единицу объема) работе дробления, из формулы (3) получим

$$A = 3^\alpha a \beta / r_n^\alpha, \quad (4)$$

где A — удельная работа, затраченная на дробление, Дж/см³; a — удельная работа образования единицы поверхности, Дж/см²; r_n — приведенный радиус раздробленного материала, см; β — размерностный коэффициент, учитывающий форму связи между затраченной работой и приращением площади поверхности частиц, см ^{$\alpha-1$} .

Величина a только в законе Риттингера является константой и имеет ясный физический смысл. В общем же случае

(при $\alpha \neq 1$) отсутствует пропорциональность площади, образующейся при разрушении поверхности, работе разрушения, что, согласно закону сохранения энергии, предполагает наличие зависимости величины a от ΔS или r_n . Поэтому в уравнении (4) величину a можно было бы выразить в виде функции r_n , а величину r_n принять обратно пропорциональной A .

Однако это не создает преимуществ по сравнению с использованным способом при получении уравнения (4). В этом уравнении величина a формально принята константой (за счет введения размерностного коэффициента), а непропорциональность между значениями A и r_n отражена при помощи показателя α , не равного единице (при $\alpha = 1$ уравнение (4) обращается в закон Риттингера). Следует отметить, что указанные условия возникают и при выведении уравнения (4) из закона Чарльза.

Введем обозначение: $3^\alpha a = R$, тогда из уравнения (4) получим (Дж/см²)

$$R = A r_n^\alpha / \beta, \quad (5)$$

а из формул (4) и (5) имеем

$$A = R / r_n^\alpha. \quad (6)$$

Полученное уравнение (коэффициент β здесь опущен) является основным уравнением, определяющим зависимость линейных размеров образующихся при разрушении частиц от затраченной удельной работы A и механических свойств материала R (т.е. выражает закон дробления). Величину R будем называть показателем удельной энергоемкости разрушения материала.

Обсуждение результатов

Разрушенный материал всегда представлен частицами (или кусками) различной крупности (различных диаметров), при этом диаметр частиц в одной совокупности может различаться на не-

сколько порядков величин. Применительно к разрушению при внезапных выбросах высказывались соображения, что различия в крупности частиц определяются неоднородностью механических свойств угля [14, 15].

Исследования механических свойств кусков угля различной крупности, выполненные методом истирания [16], показали, что прочность крупных и мелких частиц практически одинакова. Как показано в работе [17], распределение частиц дробленого угля по крупности носит вероятностный характер. Поэтому даже идеально однородный угольный пласт должен дробиться с образованием угольных частиц различной крупности.

Разрушенный уголь характеризуется обычно содержанием в нем частиц каждого класса крупности или проходом (выходом частиц по минусу). Проход определяется содержанием в разрушенной пробе частиц, имеющих диаметр меньше заданного, в процентном или долевым отношении к общей массе пробы. Непосредственно в результате ситового анализа определяется остаток на ситах, а проход частиц диаметром $<d_i$ определяется как сумма остатков на ситах, имеющих диаметр отверстий $<d_i$ плюс проход частиц диаметром $<d_{\min}$. Использование проходов удобно при построении

кумулятивных кривых, наиболее полно и наглядно характеризующих granulometric composition of the destroyed material.

Закономерности распределения частиц по крупности имеют важное практическое значение, поэтому поискам таких закономерностей уделялось большое внимание. Подробный анализ, достоинства и недостатки предложенных функций распределения приведены в [18]. Здесь же указывается, что известные формулы, описывающие функции распределения, отвечают лишь конкретным условиям измельчения и методам определения фракционного состава. Очевидно также, что функция распределения должна (или, во всяком случае, может) зависеть и от свойств измельчаемого материала.

Наличие ряда законов распределения вынуждает проверить степень применимости этих законов к интересующему нас материалу — к разрушаемому при внезапных выбросах углю. То, что для углей распределение частиц по фракциям закономерно, не вызывает сомнения. По данным работы [19] на рис. 1 показаны графики распределения частиц по крупности для раздробленных углей пластов Бабаковский и i_2 , резко различающихся по прочности, но имеющих

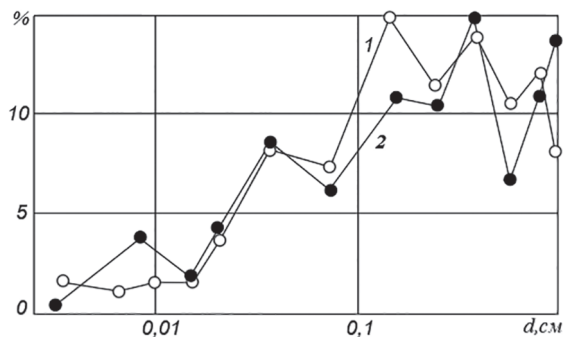
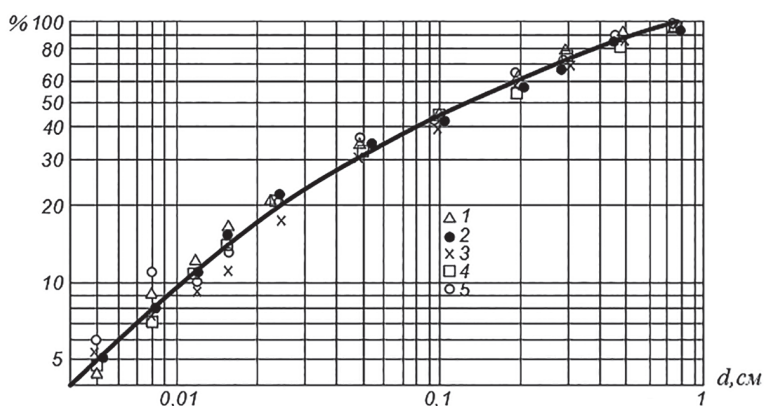


Рис. 1. Процентное содержание частиц различного диаметра в разрушенной массе угля пласта Бабаковский (1) и i_2 (2)

Fig. 1. Percentage content of particles of different diameters in the destroyed mass of coal from the Babakovskiy seam (1) and i_2 (2)



1 – пласт Соленый, $r_n = 0,0133$ см; 2 – пласт Мазур, $r_n = 0,0135$ см; 3 – пласт Дерезовка, $r_n = 0,0133$ см; 4 – пласт Никанор, $r_n = 0,0147$ см; 5 – пласт Бабаковский, $r_n = 0,0145$ см

Рис. 2. Распределение частиц по крупности для углей пластов Донбасса и обобщенная кумулятивная кривая

Fig. 2. Particle size distribution for coals from the Donbass seams and the generalized cumulative curve

близкие значения приведенного радиуса (соответственно 0,0297 и 0,0287 см).

Как указывалось в работах [14, 16, 17], распределение частиц раздробленного малопрочного угля также закономерно. Нами на эмпирической основе была сделана попытка выявить функцию распределения для таких углей.

На рис. 2 приведена информация о содержании частиц различной крупности в разрушенных пробах углей пластов Донбасса, по данным работы [19].

Угли имели различные степени нарушенности (от I до V) и на порядок величин различались по коэффициенту крепости по толчению. Но все пробы характеризовались близкими значениями приведенного радиуса.

Из рис. 2 видно, что, несмотря на существенное различие механических свойств углей, содержание частиц различной крупности описывается одной и той же кумулятивной кривой. Таким образом, содержание частиц различной крупности в разрушенных углях полностью определяется степенью диспергирования проб.

Но для обеспечения одинаковой степени диспергирования углей различной

прочности требуется различная удельная работа разрушения. Поэтому распределение частиц по крупности фактически является функцией удельной работы разрушения. Из экспериментальных данных [18] следует, что приведенный радиус частиц в пробе, являясь функцией одновременно механических свойств угля и удельной работы разрушения, может служить параметром, характеризующим распределение частиц разрушенного угля по крупности.

Энергоемкость разрушения углей при внезапных выбросах угля и газа и некоторые процессы, связанные с этим разрушением, изучали на пробах угля, взятых из разрушенной при выбросах угольной массы [19]. С целью обеспечения представительности пробы отбирали согласно стандартной методике опробования сыпучих материалов [17].

Разрушенный при выбросах уголь подвергали ситовому анализу с рассевом на 12–14 фракций, для отдельных проб выполняли также седиментационный анализ с целью определения содержания в пробах частиц диаметром менее 0,004 см. Крупные куски угля из проб дробили в копре путем сбрасыва-

вания груза до различной степени диспергирования, разрушенную массу также подвергали дисперсионному анализу. Сопоставление результатов дисперсионных анализов углей, разрушенных при внезапных выбросах и путем ударного дробления в лабораторных условиях, показывает, что выход частиц различной крупности в обоих случаях практически одинаков, если разрушенный уголь имеет одинаковую степень диспергирования, оцениваемую приведенным радиусом частиц.

В выброшенной массе обнаруживаются крупные куски угля и породы диаметром более 10 см. Возможность перемещения таких кусков в газовом потоке во взвешенном состоянии весьма проблематична. Характерным признаком внезапных выбросов является наличие в выработках так называемой «бешеной муки». Дисперсионный анализ проб «бешеной муки», взятых при выбросе на пласте Тонкий, показывает, что она на 38% состоит из частиц диаметром менее 0,008 см, хотя в ней в некотором количестве представлены и более крупные частицы — диаметром до 0,7 см. В целом отличительной особенностью «бешеной муки» является повышенное по сравнению с основной массой разрушенного при выбросе угля содержание частиц диаметром до 0,008 см, т.е. собственно угольной пыли. «Бешеная мука» — не что иное, как внесенная в выработку и осевшая угольная пыль, образовавшаяся при разрушении пласта в виде внезапного выброса.

Следует отметить, что распределение угольных частиц по крупности при разрушении угля в виде внезапного выброса ничем не отличается от распределения частиц при механическом дроблении. Это опровергает укоренившееся мнение о том, что внезапные выбросы характеризуются аномально большим выходом угольной мелочи.

Неоднократно высказывалось предположение, что с увеличением интенсивности выброса, измеряемой массой выброшенного угля, увеличивается степень диспергирования угля. Имеющиеся фактические данные не подтверждают это предположение.

Действительно, для выбросов большей интенсивности характерны низкие значения приведенного радиуса раздробленного угля, однако такие же значения имеют место и при некоторых выбросах малой интенсивности. Высокая степень дробления не является, следовательно, неизменным признаком большой интенсивности выброса. Но абсолютное количество мельчайших частиц, безусловно, зависит от интенсивности выброса. Поэтому при выбросах большой интенсивности, как правило, отмечают в выработках повышенное количество «бешеной муки».

Интенсивность выброса также не связана с прочностью угля и энергоемкостью его разрушения, по данным работы [19], удельная работа разрушения для различных угольных пластов Донбасса составила $0,27 \div 2,15$ Дж/см³.

Следует отметить, что затраты работы на разрушение пласта при внезапном выбросе не связаны с механической прочностью угля и энергоемкостью его разрушения. Даже на одном и том же пласте (например, пласт Ливенский) [19] при довольно стабильной прочности угля затраты работы на разрушение различаются в 20 раз. В целом по имеющимся данным затраты работы на разрушение пласта при внезапных выбросах на различных пластах различаются почти в 200 раз. Степень дробления угля при выбросах на более прочных пластах может быть более высокой, чем на менее прочных.

Отсюда следуют два важных с точки зрения природы внезапных выбросов выводы. Во-первых, запас энергии в пласте (энергии упругих деформаций и энер-

гии газа) не зависит от механических свойств пласта. И во-вторых, внезапные выбросы происходят не при минимально необходимых запасах энергии и работе разрушения.

Количество реализованной при выбросах энергии изменяется в широких пределах. С достаточной уверенностью можно утверждать, что большая часть реализуемой энергии связана с действием непостоянных факторов или является привносной. Из высказанных в литературе предположений о природе внезапных выбросов в числе непостоянно действующих факторов могут быть названы тектонические напряжения, наличие зон с аномально высоким газовым давлением, зоны повышенного горного давления (ПГД) и др. Повышенный запас энергии может привноситься со стороны вмещающих пород после их зависаний и ударообразных сближений почвы и кровли.

Происходящие на угольных шахтах внезапные выбросы угля и газа слагаются из двух основных механических процессов — разрушения пласта до высокой степени диспергирования и перемещения угля по выработке. Первый процесс является наиболее энергоемким, а поскольку реализация заключенного в угле газа определяется степенью дробления угля, то этот процесс можно по праву считать предопределяющим возможность возникновения внезапных выбросов и их природу.

Внезапный выброс происходит, если запас потенциальной энергии горного массива оказывается достаточным для разрушения угля до такой степени диспергирования, при которой в достаточной мере может проявиться энергия газа, расходуемая на перемещение угля. Таким образом, с энергетических позиций энергоемкость диспергирования угля является основным фактором выбросоопасности.

Исследования, результаты которых изложены в настоящей статье, показали, что в энергетическом отношении диспергирование углей выбросоопасных пластов имеет более сложную природу, чем это представлялось априорно. Сложность вызвана нарушенностью угля, неравномерным распределением и различной степенью раскрытия трещин в угольном материале. В результате этого крупные отдельности при разрушении угля образуются при меньших удельных энергозатратах, чем более мелкие, т.е. оказывается, что удельная энергоемкость дробления является функцией степени измельчения угля.

Известные законы дробления материалов становятся для углей слишком приближенными, а установленный экспериментально реальный закон дробления для углей значительно усложняется, поскольку в нем (в отличие от известных законов дробления) фигурируют уже два параметра, характеризующие механические свойства углей, в том числе (в обобщенной форме) и показатели трещиноватости угля.

Заключение

Изложенное позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Современные теории и гипотезы природы внезапных выбросов имеют энергетическую или энергосиловую основы. Поэтому основной механический процесс в природе внезапных выбросов — механизм разрушения пласта — следует рассматривать с энергетических позиций, а именно с учетом энергоемкости разрушения угля.

2. Изучение разрушенного при внезапных выбросах угля позволило получить хотя и приближенные, но фактические данные о затратах энергии при внезапных выбросах, а также составить представление о возможных механизмах разрушения угля при выбросах и сде-

лать некоторые выводы в отношении механизма его перемещения. Полученные данные можно использовать при усовершенствовании теории внезапных выбросов и других газодинамических явлений.

3. Механические (прочностные и упругие) свойства углей в значительной степени определяют выбросоопасность пластов. С одной стороны, прочностные свойства углей выступают как свойства среды, разрушаемой при внезапных выбросах, с другой стороны, упругие свойства определяют количество потенциальной энергии пласта, способной быть израсходованной на разрушение угля. Через посредство напряженного состояния пласта запас потенциальной энергии зависит также и от прочностных свойств углей.

4. При энергетическом подходе к природе внезапных выбросов угля и газа механические свойства углей удобнее всего оценивать показателями энергоемкости разрушения углей. Это позволяет при известных запасах аккумулированной пластом энергии непосредственно определять возможность и степень дробле-

ния угля. Использование предложенного показателя энергоемкости разрушения R дает возможность найти приведенный радиус частиц разрушенного угля r_n , а с его учетом — объем метановыделения из разрушенного угля. Для решения последней задачи достаточно воспользоваться зависимостями, связывающими величины метановыделения с радиусами угольных частиц и с величинами газового давления в пласте.

5. Поскольку все механические процессы имеют энергетическую основу, различными показателями механических свойств может быть дана энергетическая оценка. Отсюда следует, что между показателем удельной энергоемкости разрушения R и другими механическими показателями должны существовать функциональные или, во всяком случае, корреляционные связи. Доказательством наличия таких связей могут служить приведенные выше материалы и полученные на их основе зависимости, свидетельствующие о том, что для всех способов разрушения действительны одни и те же закономерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрин А. В. Обоснование функциональной схемы подсистемы прогноза внезапных выбросов угля и газа // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2022. — № 3. — С. 6–15.

2. Канин В. А., Пивень Ю. А., Рожко М. Д. Оценка удароопасности каменноугольных и антрацитовых пластов на шахтах Донецкого угольного бассейна // Труды РАНИМИ. — 2024. — № 2 (40). — С. 43–59.

3. Osipova I., Gospodinova V. Representation of the process of sudden outbursts of coal and gas using a knowledge graph // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 192, no. 83, article 04022. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204022.

4. Lama R., Saghafi A. Overview of gas outbursts and unusual emissions. Wollongong, 2020, 16 p.

5. Li T., Cai M. F., Cai M. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines — A km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine // International Journal of Coal Geology. 2007, vol. 71, no. 2–3, pp. 209–224.

6. Chen Y., Liu R., Xuan P. A calculation method of gas emission zone in a coal mine considering main controlling factors // Scientific Reports. 2021, vol. 11, article 23597. DOI: 10.1038/s41598-021-03090-5.

7. Романченко С. Б., Девликанов М. О. Влияние дисперсного состава угольной пыли на показатели взрывоопасности // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2019. — № 2. — С. 16–23.

8. Борисенко А. А. Разрушение призабойной зоны пласта при внезапном выбросе / Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. — М.: Недра, 1968. — С. 26.
9. Шпургалова Ю. А., Шпургалова М. Ю. Методика оптимизации параметров процесса дробления горных пород // Системный анализ и прикладная информатика. — 2015. — № 1. — С. 53–58. DOI: 10.21122/2309-4923-2015-1-53-59.
10. Segarra P., Sanchidrian J. A., Navarro J., Castedo R. The fragmentation energy-fan model in quarry blasts // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 2175–2190. DOI: 10.1007/s00603-018-1470-9.
11. Фадеенков Н. Н., Труфакин Н. И. О количественной оценке энергозатрат на дезинтеграцию пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1982. — № 3. — С. 58–61.
12. Charles R. I. Energy-size reduction relationships in comminution // *Trans. A.I.M.E.* 1957, vol. 208, pp. 80–88.
13. Борисенко А. А. Энергоемкость разрушения углей выбросоопасных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1979. — № 5. — С. 96–101.
14. Борисенко А. А., Ткаченко Е. С. Работа разрушения угля при внезапных выбросах // Уголь. — 1978. — № 12. — С. 20–23.
15. Халкечев Р. К. Применение теории мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов с целью краткосрочного прогнозирования внезапных выбросов угля и газа // Уголь. — 2019. — № 7 (1120). — С. 48–50. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50.
16. Борисенко А. А. Условия возникновения и механизм внезапных выбросов и других газодинамических явлений на шахтах // Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скопинского. — 1979. — № 182. — С. 3–11.
17. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
18. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. — Л.: Химия, 1971. — 280 с.
19. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 362 с. **ПАБ**

REFERENCES

1. Shadrin A. V. Justification of the functional diagram of the subsystem for forecasting sudden coal and gas emissions. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2022, no. 3, pp. 6–15. [In Russ].
2. Kanin V. A., Piven Yu. A., Rozhko M. D. Assessment of the rock burst hazard of coal and anthracite seams in the mines of the Donetsk coal basin. *Proceedings of RANIMI*. 2024, no. 2(40), pp. 43–59. [In Russ].
3. Osipova I., Gospodinova V. Representation of the process of sudden outbursts of coal and gas using a knowledge graph. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, no. 83, article 04022. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204022.
4. Lama R., Saghafi A. *Overview of gas outbursts and unusual emissions*. Wollongong, 2020, 16 p.
5. Li T., Cai M. F., Cai M. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines — A km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine. *International Journal of Coal Geology*. 2007, vol. 71, no. 2–3, pp. 209–224.
6. Chen Y., Liu R., Xuan P. A calculation method of gas emission zone in a coal mine considering main controlling factors. *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, article 23597. DOI: 10.1038/s41598-021-03090-5.
7. Romanchenko S. B., Devlikanov M. O. Influence of the dispersed composition of coal dust on explosion hazard indicators. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2019, no. 2, pp. 16–23. [In Russ].
8. Borisenko A. A. Destruction of the bottomhole zone of the formation during a sudden outburst. *Tekhnika bezopasnosti, okhrana truda i gornospasatel'noe delo* [Safety, labor protection and mine rescue], Moscow, Nedra, 1968, pp. 26.
9. Shpurgalova Yu. A., Shpurgalova M. Yu. Methodology for optimizing the parameters of the rock crushing process. *System analysis and applied information science*. 2015, no. 1, pp. 53–58. [In Russ]. DOI: 10.21122/2309-4923-2015-1-53-59.
10. Segarra P., Sanchidrian J. A., Navarro J., Castedo R. The fragmentation energy-fan model in quarry blasts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 2175–2190. DOI: 10.1007/s00603-018-1470-9.

11. Fadeenkov N. N., Trufakin N. I. On the quantitative assessment of energy consumption for rock disintegration. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1982, no. 3, pp. 58–61. [In Russ].

12. Charles R. I. Energy-size reduction relationships in comminution. *Trans. A.I.M.E.* 1957, vol. 208, pp. 80–88.

13. Borisenko A. A. Energy intensity of coal destruction in outburst-hazardous seams. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1979, no. 5, pp. 96–101. [In Russ].

14. Borisenko A. A., Tkachenko E. S. Work of coal destruction during sudden outbursts. *Ugol'*. 1978, no. 12, pp. 20–23. [In Russ].

15. Khalkechev R. K. Application of the theory of multifractal modeling of deformation and destruction processes of rock masses for the purpose of short-term forecasting of sudden coal and gas outbursts. *Ugol'*. 2019, no. 7 (1120), pp. 48–50. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50.

16. Borisenko A. A. Conditions of occurrence and mechanism of sudden outbursts and other gas-dynamic phenomena in mines. *Nauchnye soobshcheniya Instituta gornogo dela im. A.A. Skochinskogo*. 1979, no. 182, pp. 3–11. [In Russ].

17. Cherepanov G. P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture], Moscow, Nauka, 1974, 640 p.

18. Kouzov P. A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of dispersed composition of industrial dusts and crushed materials], Leningrad, Khimiya, 1971, 280 p.

19. Khodot V. V. *Vnezapnye vybrosy uglia i gaza* [Sudden emissions of coal and gas], Moscow, Gosgortekhzdat, 1961, 362 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гречишкин Павел Владимирович — канд. техн. наук, директор, Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр “ВНИМИ”»,
e-mail: pv_grechishkin@mail.ru, ORCID ID: 0009-0003-3974-2685,

Соколов Константин Владимирович — главный инженер, шахта «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-Уголь»,
e-mail: office@mmk-coal.ru,

Малова Светлана Андреевна — специалист по учебно-методической работе, НИТУ МИСИС, e-mail: malova.sa@misis.ru, ORCID ID: 0009-0009-7045-8694.

Для контактов: Гречишкин П.В., e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Grechishkin, Cand. Sci. (Eng.), Director, Kemerovo branch of JSC Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying-Interdisciplinary Scientific Center «VNIMI», 650002, Kemerovo, Russia, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru, ORCID ID: 0009-0003-3974-2685,

K.V. Sokolov, Chief Engineer, Chertinskaya-Koksovaya Mine, MMK-Ugol LLC, 652607, Belovo, Russia, e-mail: office@mmk-coal.ru,

S.A. Malova, Specialist in Educational and Methodological Work, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: malova.sa@misis.ru, ORCID ID: 0009-0009-7045-8694.

Corresponding author: P.V. Grechishkin, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru.

Получена редакцией 17.04.2024; получена после рецензии 15.05.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 17.04.2024; received after the review 15.05.2024; accepted for printing 10.11.2024.