

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 5

УДК 622.831 : 622.016.62

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ
В УГОЛЬНО-ПОРОДНЫХ ОБРАЗЦАХ И ХАРАКТЕР ИХ РАЗРУШЕНИЯ**

Гуанбо Чен^{1,2}, Цзин Чжан¹, Юцзюнь Сюй³, Тань Ли¹, Эрю Ван¹, Гохуа Чжан⁴

¹*Институт разработки угольных месторождений, Университет науки и технологий Внутренней Монголии,
E-mail: cgb150617@126.com, 2019958@imust.edu.cn, г. Баотоу, Внутренняя Монголия, 014010, Китай*

²*Колледж горного дела и энергетических ресурсов,*

Шаньдунский университет науки и технологий, г. Циндао, 266590, Китай

³*Университет науки и технологий Внутренней Монголии,*

г. Баотоу, Внутренняя Монголия, 014010, Китай

⁴*Кафедра горного дела, Хэйлунцзянский университет науки и технологий,
г. Харбин, Хэйлунцзян, 150022, Китай*

Выполнен анализ распределения энергии в угольно-породных образцах при их нагружении. Установлено, что разница накопленной энергии между углем и породой в основном зависит от их модулей упругости. На основе рассмотрения структурных характеристик и механических свойств угля и породы построена и проанализирована механическая модель угольно-породного тела и получена формула распределения энергии по компонентам. По результатам нагрузочных испытаний разработана энергетическая модель, позволяющая рассмотреть процесс деформирования угольно-породного тела. Предложен оценочный коэффициент склонности угольно-породного тела к ударному разрушению, учитывающий разницу энергии упругой деформации между компонентами и время высвобождения энергии. Этот коэффициент можно рассматривать в качестве критерия для оценки склонности угольно-породной среды к горному удару.

Горное дело, система “уголь – порода”, составной материал, адгезивы, анализ физических свойств, хрупкое разрушение, дефект материала, коэффициент склонности к горному удару

DOI: 10.15372/FTPPI20240509

EDN: ANFTQG

Китай является крупнейшим производителем и потребителем угля, на долю которого приходится примерно 45 % от общемировой отработки мощных угольных пластов [1, 2]. В настоящее время в Китае наблюдается плавный переход к эксплуатации глубоко залегающих угольных пластов. Добыча угля на глубине свыше 1000 м осуществляется на 63 шахтах. Среднее увеличение глубины добычи находится в диапазоне 10–25 м в год. Следует отметить, что это общемировая тенденция. Так, в ЮАР глубина добычи превысила 4000 м [3].

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 52304142) и Фонда фундаментальных исследований колледжей и университетов Автономного региона Внутренняя Монголия (2023QNJS108).

Добыча полезных ископаемых на большой глубине сопряжена с высокой частотой динамических катастрофических явлений, наиболее серьезный из которых — горный удар. В 2021 г. в Китае зафиксировано 26 случаев горных ударов, включая 4 катастрофических, в результате которых погибло в общей сложности 38 человек. Несмотря на постоянное совершенствование систем предупреждения и мониторинга, горные удары несут угрозу безопасности и технологическому процессу угледобычи.

Горный удар представляет собой динамическое явление, характеризующееся кратковременной потерей устойчивости углепородного массива под действием горного давления. Основная черта горного удара заключается во внезапном высвобождении накопленной энергии. В этой связи в [4, 5, 6] выполнена оценка склонности угольно-породного тела (УПТ) к горному удару. В [7, 8] рассмотрены механизм диссипации энергии из УПТ в процессе нагружения и возможность горного удара в зависимости от энергии акустической эмиссии. В [9] исследован механизм эволюции энергии в УПТ в условиях равномерной и циклической одноосной нагрузки. В [10, 11] выполнен анализ постпиковой характеристики разрушения УПТ с энергетической точки зрения и построена нелинейная модель соотношения напряжения и деформации. В [12] изучены параметры энергетического перераспределения и деформационного разрушения УПТ, в [13] с этой целью разработана трехмерная модель. В [14] установлен механизм накопления и высвобождения энергии в УПТ с разными углами падения. В [15] рассмотрена интенсивность перераспределений упругой энергии в УПТ с разными модулями упругости и соотношениями угля к породе. В [16] исследовано влияние доли породного компонента на механические свойства и характеристики акустической эмиссии в УПТ. В [17] при оценке развития внутренних трещин методами компьютерной томографии и акустической эмиссии установлено, что механические свойства и характер разрушения УПТ в основном зависят от угольного компонента. В [18] приведены характеристики акустической эмиссии и накопления энергии газосодержащего УПТ, в [19] — механические свойства и характеристики накопления энергии УПТ в условиях высокой скорости нагружения.

Проходка подземных выработок и отработка выемочных камер меняет изначально равновесное напряженное состояние массива, в результате формируются области концентрации напряжений в их окрестностях. Из-за антропогенного воздействия на массив происходит быстрое повреждение структуры окружающего угля и породы на большой площади, что приводит к горным ударам. Угольно-породный массив вблизи выработки находится под воздействием значительных напряжений. Такое состояние можно считать крайне неустойчивым со значительной вероятностью разрушения.

Анализ большого количества катастрофических явлений показывает, что горный удар является результатом не только поведения угля или породы в отдельности, но и результатом их взаимодействия. В этой связи для составления наиболее адекватных практических инженерных рекомендаций необходимо изучать динамические характеристики угольно-породного массива с точки зрения наиболее приближенной к его фактическому состоянию.

В рамках настоящей работы на основе рассмотрения структурных характеристик и механических свойств угля и породы построена модель комбинированного угольно-породного тела, для которого выведена расчетная формула определения количества накапливаемой энергии. Механизм накопления энергии в УПТ изучен в условиях одноосного сжатия. Выполнен анализ особенностей процесса накопления энергии и степени разрушения УПТ. По результатам анализа разработана энергетическая модель на основе теории диссипативных структур и предложен коэффициент склонности УПТ к горному удару с целью получения надежного инструмента для точного определения устойчивости и склонности системы “уголь – порода” к горному удару.

РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО ТЕЛА

Теоретический анализ разницы количества накапливаемой энергии между углем и породой при одинаковом уровне напряжений. Каждая порода в системе “уголь – порода” обладает различными физико-механическими свойствами, такими как модуль упругости, коэффициент Пуассона и т. д., а также различными характеристиками накопления энергии. В общем виде в условиях одноосного сжатия количество объемной плотности накопленной энергии можно определить следующим образом:

$$U = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma = \frac{1}{2E} \sigma^2, \quad (1)$$

где U — плотность накопленной энергии в породе; ε — относительная деформация породы; σ — напряжение в породе.

Если известны значения модуля упругости, деформации и напряжения, то можно оценить плотность накопленной энергии упругости в породе. Согласно (1), энергия упругой деформации имеет положительную корреляцию с напряжением и отрицательную корреляцию с модулем упругости породы, т. е. чем больше модуль упругости при одинаковом напряжении, тем меньше количество накопленной энергии упругой деформации.

На рис. 1. представлены величины плотности накопленной энергии в известняке, сланце, мелкозернистом и среднезернистом песчанике, а также угля 1 и угля 2 при двух уровнях напряжения, определяемого их прочностями на сжатие. Согласно [10], модуль упругости угля 1 составляет 4.49 ГПа, прочность на сжатие — 15.84 МПа; модуль упругости угля 2 — 2.31 ГПа, прочность на сжатие — 27.49 МПа. Видно, что в данных условиях модуль упругости рассматриваемых типов породы (угля) постепенно уменьшается, а количество накопленной энергии увеличивается. Прочность угля 1 на одноосное сжатие меньше прочности угля 2, поэтому угля 2 не может достигнуть уровня напряжения угля 1.

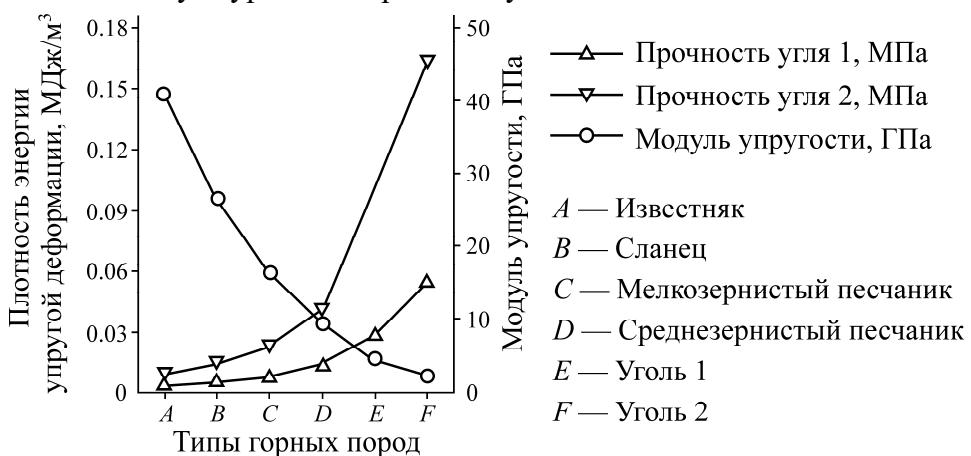


Рис. 1. Характеристики накопления энергии различными горными породами

На рис. 2 показана связь отношения модулей упругости породы и угля и разницы плотности, накопленной углем и породой энергии, при одинаковом уровне напряжения по данным работ [10, 20]. Чем меньше отношение модулей упругости породы и угля, тем меньше разница между количеством накопленной энергии в угле и породе. При одинаковом уровне напряжения это следует из зависимости:

$$\frac{U_c}{U_r} = \frac{\frac{1}{2E_c}\sigma^2}{\frac{1}{2E_r}\sigma^2} = \frac{E_r}{E_c}, \quad (2)$$

где E_c, E_r — модули упругости угольного и породного компонентов соответственно; U_c, U_r — количество плотности накопленной энергии в угольном и породном компонентах соответственно; σ — уровень напряжения.

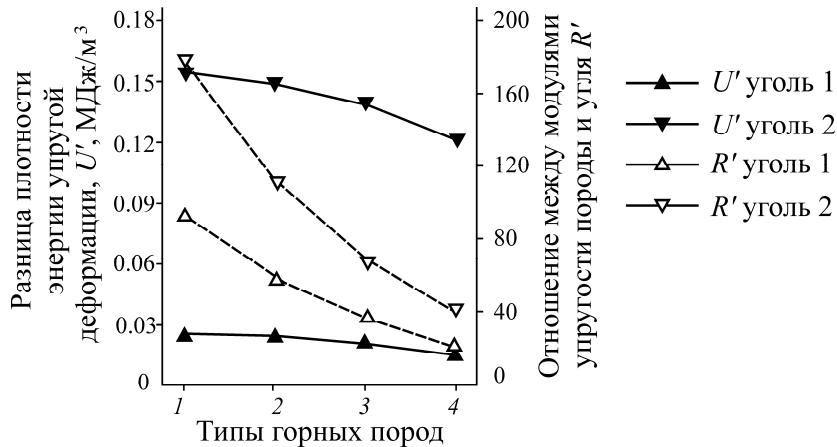


Рис. 2. Разница плотности энергии упругой деформации между различными типами породы и углем: 1 — известняк; 2 — сланец; 3 — мелкозернистый песчаник; 4 — среднезернистый песчаник

В системе “уголь – порода” накопление энергии происходит в результате действия горного давления. Если опустить собственный вес угля и породы, то угольные и породные тела будут накапливать разное количество энергии при одинаковом уровне горного давления. Отметим, что оценочное значение модулей угля и породы, приведенное в [10], недостаточно точное для обработки данных эксперимента, поэтому возникает разница с фактическим значением количества накопленной энергии.

Расчетная формула накопленной энергии при разрушении угольно-породного тела. Для исследований применялся метод определения накопления энергии угольного и породного компонентов УПТ: по результатам испытаний на сжатие определялась кривая “напряжение – деформация”, затем устанавливалась площадь, заключенная между кривой до пикового значения деформации и горизонтальной осью. Это и будет составлять накопленную энергию.

Расчетная формула детально рассмотрена на примере УПТ с одинаковым диаметром компонентов. Прочность породы на сжатие значительно превышает прочность угля. При нагружении в момент разрушения угля порода находится в стадии упругой деформации [21]. На основе структурных характеристик и механических свойств угля и породы построена механическая модель УПТ (рис. 3).

Со стороны испытательной машины к УПТ прикладывается осевое усилие F , под его воздействием образец постепенно сжимается. В первую очередь происходит разрушение угольного компонента, и в этот момент порода находится в стадии упругой деформации.

Опустим малое рассеивание энергии в породе и упростим породу до упругого тела, которое представлено в модели в виде пружины. Примем усилие на верхнем торце породного компонента как F_1 , а площадь торца как S_1 , тогда напряжение на этом торце σ_1 будет определяться следующей формулой:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_1}. \quad (3)$$

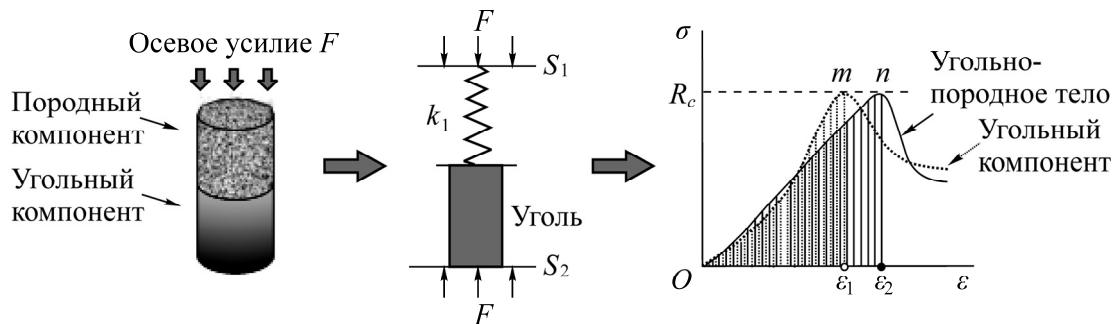


Рис. 3. Механическая модель деформирования угольно-породного тела

Исходя из условия равновесия, напряжение на верхнем F_1 и нижнем F_2 торцах образца, а также на границе раздела F_3 будут равны между собой:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{F}{\pi r^2}. \quad (4)$$

Угольно-породные формации состоят из нескольких породных слоев с уникальными механическими свойствами, поэтому испытания на одноосное сжатие выполнены при условии, что УПТ является единым телом. Для регистрации относительной деформации УПТ в целом использовался длинный тензодатчик, для определения относительной деформации угольного компонента — короткий тензодатчик. В результате испытаний получена кривая “напряжение – деформация” как для всего УПТ, так и для угольного компонента в отдельности (рис. 3). На основании развития двух кривых получено значение общей предпиковой накопленной энергии E в УПТ, которое определяется площадью $S(0\epsilon_2)$ между кривой до пикового значения деформации и горизонтальной осью. Значение предпиковой накопленной энергии в угольном компоненте E_c также обусловлено площадью $(0\epsilon_1)$ между кривой до пикового значения деформации и горизонтальной осью. Накопленная энергия в породном компоненте определяется разностью между общей накопленной энергией и накопленной энергией в угольном компоненте:

$$E_r = E - E_c = S(0\epsilon_2) - S(0\epsilon_1). \quad (5)$$

Данный метод позволяет проанализировать энергетическую пропорцию угольно-породного материала перед разрушением с помощью экспериментальных данных испытаний УПТ, а также изучить механизм распределения энергии в УПТ перед разрушением. Исходя из описанного подхода, можно получить формулу расчета распределения энергии по компонентам для УПТ с разными диаметрами компонентов. В этом случае усилия, действующие на компоненты на границе раздела, будут равны между собой $F_c = F_r$. Можно записать соотношение, связывающее напряжения в компонентах и площади их сечений:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_r} = \frac{S_r}{S_c}. \quad (6)$$

Здесь σ_c , σ_r и S_c , S_r — напряжение и площади сечения угольного и породного компонентов соответственно.

ИСПЫТАНИЯ УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО ОБРАЗЦА НА СЖАТИЕ

Образец получен из пласта № 12 угольной шахты Hegang группы угледобывающих предприятий Heilongjiang Longmei. Мощность пласта № 12 составляет 3.4 м, угол падения — 3–5°. Прочность угля на одноосное сжатие — 14.38 МПа, модуль упругости — 1475 МПа. Кровля пласта состоит из крупнозернистого песчаника мощностью 3.5 м. Прочность песчаника на сжатие составила 62.76 МПа, модуль упругости 3938 МПа. В шахте произошло два динамических явления (5.04.2018 и 6.01.2021), которые не привели к гибели рабочих или обрушению, однако повлияли на процесс добычи.

Образцы подготовлены в соответствии со стандартами механических испытаний горных пород. Отклонение параллельности между торцами не превышает 0.01 мм, разница в диаметре между торцами не более 0.02 мм. Процесс подготовки образцов описан в [22]. В ходе испытаний соблюдались следующие требования:

- общий размер УПТ равен размеру стандартного образца с диаметром 50 мм и высотой $h = 100$ мм. Отношение высоты к диаметру составляет 2 : 1;
- мощность пласта составляет 3.4 м, мощность кровли — 3.5 м, т. е. отношение мощности пласта к мощности кровли примерно равно 1 : 1, поэтому для отражения фактических условий отношение угля к породе установлено также на значении 1 : 1;
- для соединения угольного и породного компонентов применялись способы, разработанные ранее в [9, 23, 24], такое использование близко к реальным условиям границы раздела;
- к УПТ прикреплены высокоточные тензодатчики для измерения осевой деформации как УПТ в целом, так и его компонентов.

Нагружение УПТ проводилось на установке TAW-2000kN. Испытания проведены при следующих значениях скорости нагружения: 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 и 0.1 мм/с, которые обеспечивают статическое нагружение. Для снижения ошибки испытаний при каждой скорости нагружения выполнены испытания пяти образцов (УПТ).

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО ТЕЛА

Прочность УПТ. В результате нагрузочных испытаний при различной скорости нагружения получены значения прочности УПТ, которые представлены на рис. 4а. Видно, что прочность на сжатие всех УПТ изменяется в диапазоне 15.48–29.50 МПа. Прочность УПТ больше, чем прочность угля в отдельности на 1.10–15.12 МПа, т. е. породный компонент оказывает определенное влияние на прочность УПТ. При скорости нагружения 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 и 0.1 мм/с средняя прочность на сжатие составила 17.20, 19.10, 22.66, 25.06 и 26.80 МПа соответственно. При увеличении скорости нагружения происходит плавный рост значений прочности на сжатие.

В результате аппроксимации экспериментальных данных получена зависимость прочности УПТ на сжатие от скорости нагружения $y = 26.05 - 9.93 \cdot 1.94^x$ с коэффициентом корреляции 0.97. При скоростях нагружения 0.001, 0.005 и 0.01 мм/с отмечается быстрое увеличение прочности, затем оно замедляется и далее стремится к устойчивому значению. Это свидетельствует о том, что прочность УПТ на сжатие чувствительна к изменениям малых скоростей нагружения.

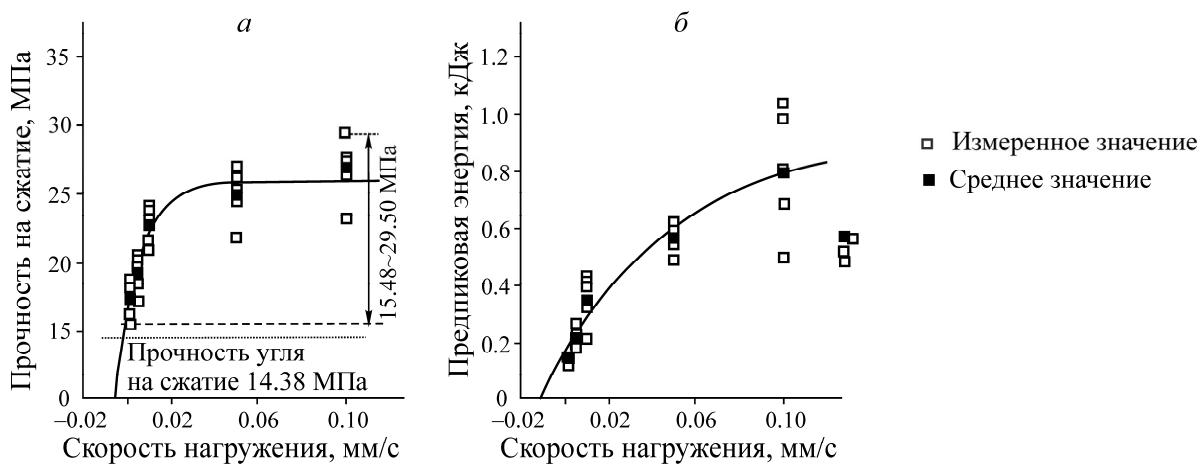


Рис. 4. Прочность на сжатие угольно-породных тел (а) и предпиковая накопленная энергия (б) при различных значениях скорости нагружения

Согласно рис. 4а, при увеличении скорости нагружения повышается дисперсия данных прочности на сжатие. Чем больше скорость нагружения, тем больше неустойчивость механических свойств УПТ.

Предпиковая энергия УПТ. Графики зависимостей “напряжение – деформация” из-за их большого размера не представлены в статье. С помощью ПО Origin определена площадь между кривой до пикового значения деформации и горизонтальной осью, т. е. предпиковой накопленной энергии. По полученным результатам построен соответствующий график (рис. 4б).

Средняя предпиковая накопленная энергия при скорости нагружения 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 и 0.10 мм/с составила 0.134, 0.217, 0.354, 0.570 и 0.808 кДж соответственно. При увеличении скорости нагружения предпиковая накопленная энергия плавно растет, однако интенсивность увеличения плавно снижается. Получена зависимость предпиковой накопленной энергии в УПТ от скорости нагружения $y = 0.93 - 0.77 \cdot 3.64^x$ с коэффициентом корреляции 0.97. При увеличении скорости нагружения некоторые трещины в УПТ не имеют возможности закрыться или расширяться вовремя, что повышает прочность УПТ и увеличивает предпиковую накопленную энергию.

Следует отметить, что при скорости нагружения 0.001 мм/с разница между максимальной и минимальной предпиковой накопленной энергии для пяти групп образцов составила 0.027 кДж; а при скорости нагружения 0.1 мм/с — 0.542 кДж. Следовательно, чем меньше скорость нагружения, тем меньше дисперсия значений накопленной энергии УПТ, и наоборот. Иначе, чем больше скорость нагружения, тем менее устойчивым является процесс разрушения УПТ.

МЕХАНИЗМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В УГОЛЬНО-ПОРОДНОМ ТЕЛЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ

Распределение накопленной энергии по компонентам в УПТ. По расчетной формуле можно определить общее количество накопленной энергии в УПТ и количество накопленной энергии в угольном и породном компонентах в отдельности. На основе этой формулы можно проанализировать механизм распределения энергии в УПТ.

Из рис. 5а видно, что при увеличении скорости нагружения происходит плавное увеличение накопленной энергии в угольном компоненте со средними значениями 0.08, 0.15, 0.27, 0.47 и 0.72 кДж соответственно. Зависимость количества накопленной энергии в угольном компо-

ненте от скорости нагружения описывается уравнением $y = 0.99 - 0.89 \cdot (9.69 \cdot 10^{-6})^x$ с коэффициентом корреляции 0.95. При больших значениях скорости нагружения наблюдается неполное развитие трещин, поэтому может быть накоплено дополнительное количество энергии. Согласно кривой аппроксимации, накопленная энергия угольного компонента резко увеличивается на малых скоростях нагружения и интенсивность ее роста плавно снижается с увеличением скорости нагружения. Также при высокой скорости нагружения неустойчивость механических свойств УПТ становится более очевидной. При скорости нагружения 0.001 мм/с разница накопленной энергии в угольном компоненте между максимальным и минимальным значением составила 0.020 кДж, а при 0.1 мм/с — 0.533 кДж.

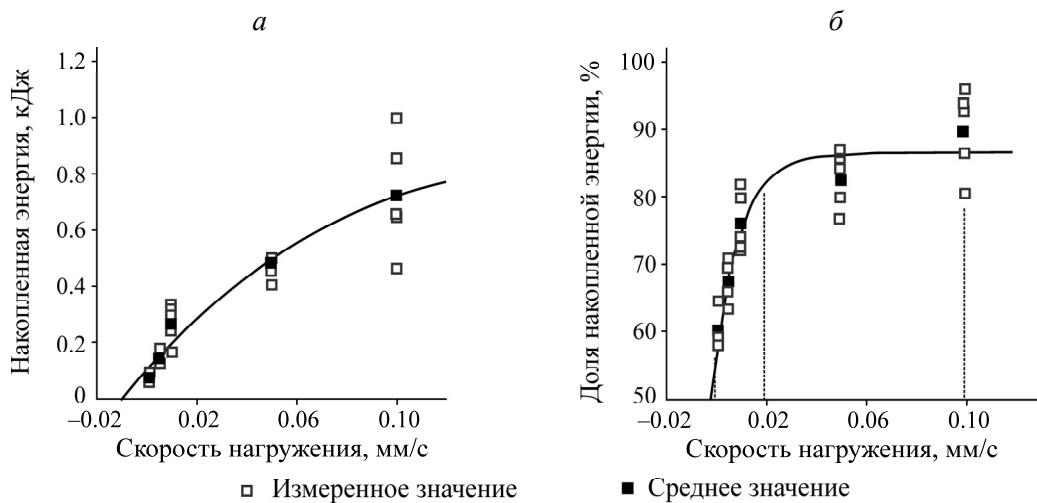


Рис. 5. Количество (а) и доля накопленной энергии (б) в угольном компоненте

На рис. 5б показана доля накопленной энергии в угольном компоненте при различных значениях скорости нагружения. При увеличении скорости нагружения доля накопленной энергии составила 60.19, 67.36, 76.08, 82.38 и 89.72 %, т. е. при всех рассматриваемых значениях скорости нагружения доля энергии в угольном компоненте превышает 50 %. Угольный компонент является основным телом, накапливающим энергию, и играет ключевую роль в механизме разрушения УПТ. Зависимость доли накопленной энергии в угольном компоненте от скорости нагружения описывается уравнением $y = 86.38 - 28.93(3.39 \cdot 10^{-41})^x$ при $R^2 = 0.90$. В диапазоне скорости нагружения 0 – 0.02 мм/с наблюдается быстрое увеличение доли накопленной энергии в угольном компоненте, а затем интенсивность роста уменьшается.

Увеличение скорости нагружения приводит к постепенному увеличению накопленной энергии в породном компоненте со средними значениями 0.05, 0.07, 0.09, 0.10 и 0.08 кДж соответственно (рис. 6а). Зависимость накопленной энергии в породном компоненте от скорости нагружения описывается уравнением $y = 0.09 - 0.05 \cdot (6.51 \cdot 10^{-73})^x$ с коэффициентом корреляции 0.89. При малой скорости нагружения (0–0.02 мм/с) происходит увеличение накопленной энергии, а далее она остается почти постоянной. Также при высокой скорости нагружения неустойчивость механических свойств УПТ становится более очевидной. При 0.1 мм/с дисперсия значений достигает 0.128 кДж.

На рис. 6б приведена доля накопленной энергии в породном компоненте при различных значениях скорости нагружения. С увеличением скорости нагружения доля накопленной энергии в породном компоненте составила 39.81, 32.64, 23.92, 17.62 и 10.28 % соответственно. При всех рассматриваемых значениях скорости нагружения доля накопленной энергии в по-

родном компоненте менее 50 %. Зависимость доли накопленной энергии в породном компоненте от скорости нагружения описывается уравнением $y = 28.93 \cdot e^{-x/0.01} + 13.62$ с точностью 0.90. При увеличении скорости нагружения наблюдается резкое уменьшение доли энергии в породном компоненте, затем она стремится к постоянному значению.

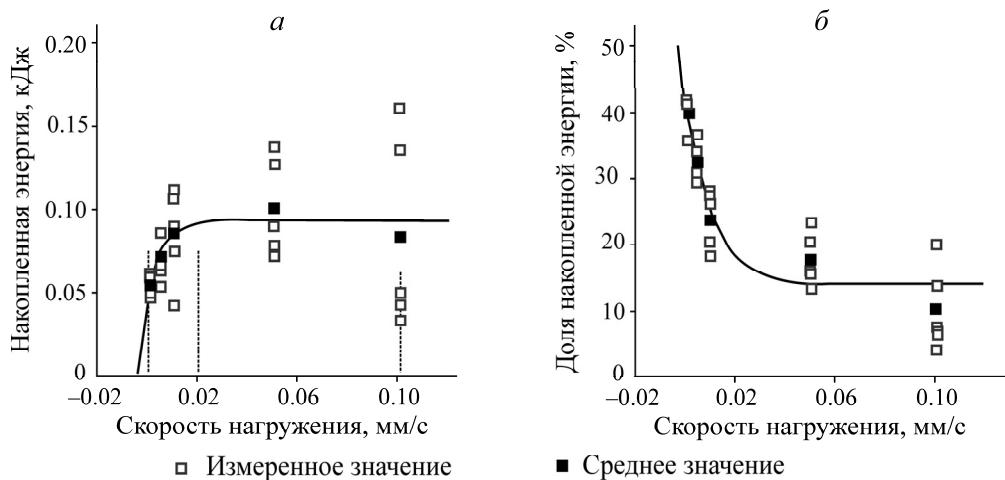


Рис. 6. Количество и доля накопленной энергии в породном компоненте

Энергетический анализ компонентов УПТ. Неустойчивость системы “уголь – порода” связана не только с накопленной в ней энергией, но и с разницей накопления энергии между угольным и породным компонентами. В настоящей работе выполнено испытание УПТ на одностороннее сжатие и определены доли накопленной энергии в компонентах перед разрушением.

На основании полученных данных можно рассчитать разницу накопленной энергии между компонентами (рис. 7а). С увеличением скорости нагружения постепенно увеличивается разница энергии между угольным и породным компонентами, которая составила 0.027, 0.075, 0.183, 0.367 и 0.639 кДж соответственно. Кривая аппроксимации (штриховая линия) показывает, что существует линейная зависимость разницы энергии между компонентами от скорости нагружения, которая описывается уравнением $y = 5.85x + 0.06$ с коэффициентом корреляции 0.97.

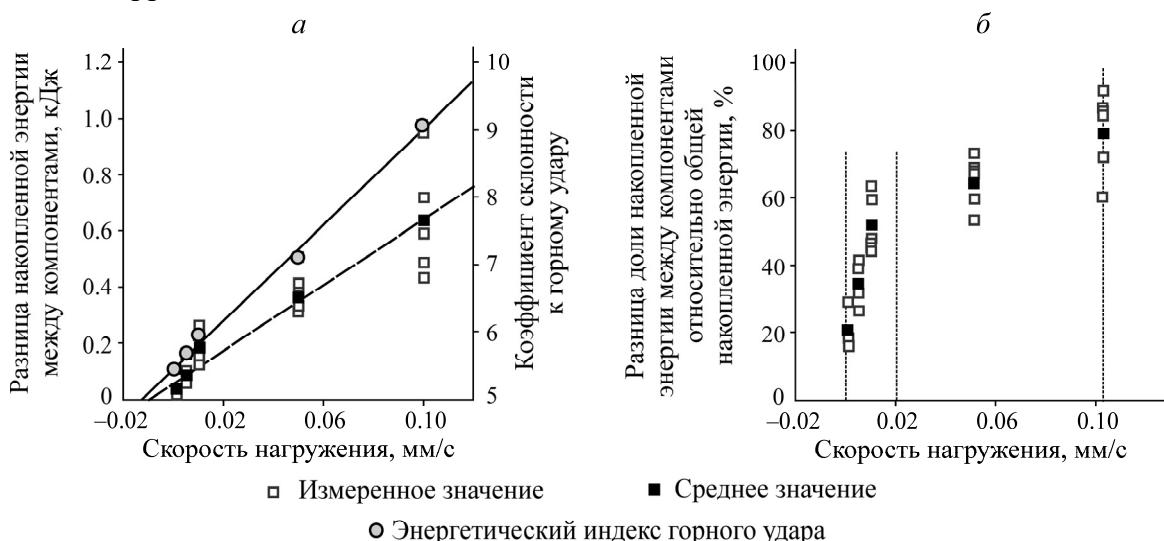


Рис. 7. Разница количества (а) и доли накопленной энергии (б) между угольным и породным компонентами

Склонность к горному удару является неотъемлемым свойством угольно-породного материала, которое влияет на ударные характеристики системы “уголь – порода”. Энергетический индекс горного удара K_E — общепринятый показатель оценки склонности угольно-породных материалов к удару, обеспечивающий простую, быструю и точную оценку. Индекс K_E представляет собой отношение предпиковой энергии упругой деформации к постпиковой энергии диссипации в условиях одноосного сжатия. Индекс $K_E \geq 5.0$ обозначает сильную склонность к удару; $1.5 \leq K_E < 5.0$ — слабую склонность к удару; $K_E \leq 1.5$ — отсутствие склонности к удару.

Полученные в экспериментах значения энергетического индекса горного удара при разных скоростях нагружения приведены на рис. 7а сплошной линией. С увеличением скорости нагружения коэффициент энергетического индекса линейно возрастает. Зависимость между коэффициентом энергетического индекса и скоростью нагружения составила $y = 35.52x + 5.47$ с точностью 0.98. На основании полученных прочностных свойств УПТ можно установить, что при увеличении скорости нагружения происходит постепенное повышение предрасположенности УПТ к удару. Добавление породного компонента повышает ударопрочность угля. Установлена взаимосвязь склонности УПТ к удару с разницей накопленной энергии между компонентами: чем больше разность энергии, тем более УПТ склонно к проявлению горного удара.

На рис. 7б приведена разница доли накопления энергии между компонентами при различных значениях скорости нагружения, которая увеличивается и постепенно переходит в устойчивое состояние. До 0.02 мм/с происходит ее значительный рост, а после значения 0.02 мм/с показатель стремится к постоянному состоянию.

Из приведенных данных видно, что чем больше скорость нагружения, тем больше разница накопленной энергии между компонентами и тем сильнее склонность УПТ к удару. Практика показывает, что скорость нагружения (или разница накопленной энергии в УПТ) оказывает большое влияние на характер разрушения. На рис. 8 продемонстрированы варианты характера разрушения и развития трещин в УПТ при различных значениях скорости нагружения.

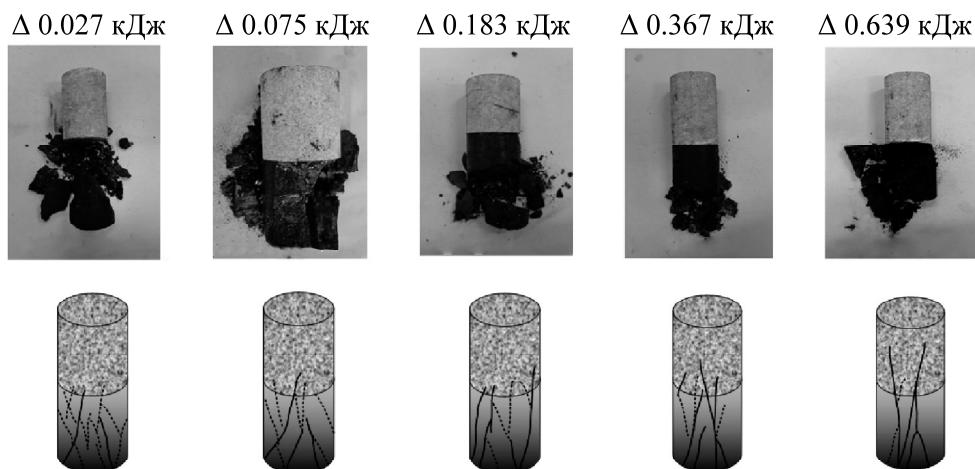


Рис. 8. Характер разрушения угольно-породного тела при различных значениях разницы накопленной энергии между компонентами

При скорости нагружения 0.001 мм/с разница накопленной энергии между компонентами составляет $\Delta 0.027\text{ кДж}$ и вследствие разрушения угля образуется большое количество мелко-дисперсных угольных частиц. Это обусловлено тем, что при малой скорости нагружения образуется большое количество трещин, которые распространяются по телу угольного компонента. В процессе сжатия происходит трение на границе раздела между компонентами, в результате

которого образуются мелкодисперсные угольные частицы и небольшие кусочки угля. При скорости нагружения 0.1 мм/с разность накопленной энергии между компонентами составила Δ 0.639 кДж. В этом случае образуется большое количество мелких частиц с неправильной геометрической формой и малое количество мелкодисперсных частиц. При такой скорости нагружения уголь склонен к хрупкому разрушению. При высокой скорости нагружения образуется малое количество трещин. Разрушение угольного компонента начинается локально по первичным трещинам и постепенно заканчивается общим.

Разница накопленной энергии между компонентами в УПТ оказывает большое влияние на характер и механизм разрушения. При малой разнице накопленной энергии происходит полное разрушение угля с большим количеством трещин. Накопленная энергия медленно рассеивается в виде развития трещин по слабым плоскостям; разрушение угля имеет вязкий характер. При большой разнице накопленной энергии наблюдается неполное разрушение образца с неполным развитием трещин. Особенность разрушения угля заключается в том, что локальное разрушение вызывает общую неустойчивость, а накопленная до пика энергия в основном быстро вы свобождается в виде кинетической энергии удара. Чем больше разница накопленной энергии между компонентами, тем УПТ имеет более очевидные показатели хрупкого разрушения. Влияние разницы накопленной энергии между компонентами на разрушение в основном проявляется в шести аспектах: степень развития трещины, размер поврежденного блока, количество поврежденных блоков, скорость высвобождения энергии, форма разрушения и механизм потери устойчивости (таблица).

Влияние разницы накопленной энергии между компонентами на характер разрушения угольно-породного тела

| Критерий | Малая разница накопленной энергии | Большая разница накопленной энергии |
|--------------------------------|--|--|
| Степень развития трещин | Полное развитие с большим количеством трещин | Неполное развитие с малым количеством трещин |
| Размер разрушенных блоков | Небольшой размер с появлением мелкодисперсных частиц | Большой размер с появлением мелкодисперсных частиц |
| Количество разрушенных блоков | Много | Мало |
| Скорость высвобождения энергии | Медленное рассеивание | Быстрое высвобождение |

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО ТЕЛА

Большой объем исследований в области термодинамики необратимых процессов выполнен И. Пригожиным, который разработал теорию устойчивости термодинамики нелинейных необратимых процессов и предложил теорию диссипативных структур. Данная теория рассматривает открытую систему, в которой поставлен акцент на процессе перехода от беспорядочного состояния к упорядоченному. Открытая система, далекая от состояния равновесия, может демонстрировать явление самоорганизации посредством внутреннего воздействия, когда внешние условия достигают определенного порога в условиях постоянного вещественного и энергетического обмена с внешней средой. В этих условиях система может самопроизвольно переходить из исходного беспорядочного состояния в упорядоченное, в результате образуется новая устойчивая упорядоченная структура. Процесс разрушения УПТ можно рассматривать как процесс достижения нового устойчивого равновесного состояния путем непрерывного энергетического обмена с внешней средой.

На основе рассмотренной теории взаимосвязи разности накопленной энергии между компонентами тела и характером его разрушения построена модель, которая описывает процесс перехода УПТ из устойчивого равновесного состояния в неустойчивое и затем в новое устойчивое равновесное состояние, а также описывает механизм разрушения УПТ в результате потери устойчивости (рис. 9).

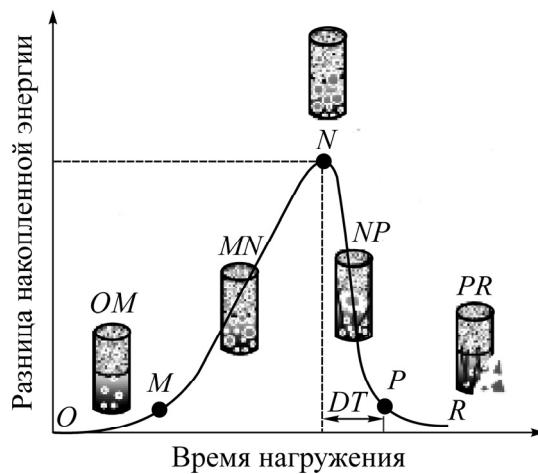


Рис. 9. Энергетическая модель деформирования угольно-породного тела

Точка O: Нагрузка не приложена, разница накопленной энергии между компонентами равна 0, УПТ находится в устойчивом равновесном состоянии. Малое количество собственной энергии компонентов в статическом состоянии не учитывается.

Участок OM: С увеличением времени нагружения разница накопления энергии между компонентами постепенно увеличивается. На этом этапе происходит закрытие трещин внутри компонентов, что приводит к рассеиванию некоторой части энергии. Наблюдается малая разница накопленной энергии между компонентами; УПТ находится в квазистабильном состоянии.

Участок MN: После полного закрытия внутренних трещин в УПТ, угольная порода на этом этапе может рассматриваться как эластомер. Происходит накопление большего количества энергии в компонентах. Очевидно, что скорость накопления энергии в угольном компоненте выше, чем в породном. Следовательно, разница накопления упругой энергии постепенно увеличивается, и этот процесс относительно стабильный. Однако на более поздней стадии данного этапа это увеличение замедляется, что связано с разрушением некоторых слабых структур в угольном компоненте. При этом происходит поглощение части энергии и уменьшение накопления энергии упругой деформации. На этой стадии УПТ находится в метаустойчивом состоянии.

Точка N: Данная точка является критической, так как разница накопления энергии упругой деформации между компонентами достигает максимума. Дальнейшее увеличение внешнего воздействия УПТ приводит к потере устойчивости равновесия образца. В этой точке УПТ наиболее подвержено разрушению и находится в критическом состоянии.

Участок NP: При продолжении нагружения происходит разрушение УПТ и мгновенное высвобождение накопленной энергии. Разрушение УПТ на этом этапе можно разделить на два типа: устойчивое и неустойчивое. При малой избыточной энергии разрушение будет иметь устойчивый характер с малой степенью повреждений. При большой избыточной энергии разрушение будет иметь неустойчивый характер со значительными повреждениями. В этом слу-

чае происходит выброс обломков угля с определенной кинетической энергией, что показывает ударный характер разрушения. Отметим, что чем больше разница накопленной упругой энергии между компонентами, тем сильнее ударный эффект. Независимо от того, какие повреждения возникают внутри УПТ, накопленная энергия, а также разница накопленной энергии быстро уменьшаются. На данном этапе УПТ находится в неустойчивом состоянии.

Участок PR: После прохождения этапа неустойчивого состояния происходит изменение УПТ за счет внутренней самоорганизации. В результате образуется новая диссипативная структура и УПТ принимает новое устойчивое состояние.

Кривая “время нагружения – разница накопленной энергии между компонентами” похожа на кривую “напряжение – деформация”. Участки *OM*, *MN*, *NP* и *PR* соответствуют стадиям уплотнения, упругопластической деформации, постпикового разрушения и релаксации напряжений на кривой “напряжение – деформация” соответственно.

Ударная неустойчивость системы “уголь – порода” должна описываться математическим выражением энергии и времени. Ударный эффект УПТ также характеризуется функциональной зависимостью между внутренней накопленной энергией и временем ее высвобождения. Следовательно, можно аналитически описать склонность УПТ к удару с точки зрения накопленной энергии и времени ее высвобождения. На основе ранее построенной модели, учитывющей разницу упругой энергии и времени разрушения, предложен энергетический коэффициент η , определяющий склонность УПТ к ударному разрушению, представляющий собой отношение разности упругой энергии к времени разрушения. В случае равного объема компонентов УПТ можно принять выражение энергетического коэффициента через плотности запасенной энергии в виде

$$\eta \approx \frac{U_c - U_r}{DT} = \left(\frac{1}{2E_c} \sigma^2 - \frac{1}{2E_r} \sigma^2 \right) \frac{1}{DT} = \left(\frac{1}{E_c} - \frac{1}{E_r} \right) \frac{\sigma^2}{2DT}, \quad (7)$$

где η — энергетический коэффициент УПТ, характеризующий его склонность к удару; DT — время разрушения УПТ.

Предложенный коэффициент определяется модулями упругости компонент, уровнем напряжений и временем разрушения УПТ. Он учитывает не только особенности внутренней структуры и механические свойства угля и породы, но и условия внешнего нагружения (уровень напряжения) и время динамического разрушения УПТ и является многомасштабным определяющим параметром для точного прогнозирования склонности УПТ к удару. Коэффициент η отражает разницу накопленной энергии между компонентами в единицу времени разрушения. Согласно (7), чем больше разница модуля упругости между углем и породой, тем больше склонность к удару, что подтверждается исследованиями [25]. Кроме того, можно заключить, что к большой склонности к удару приводит или увеличение напряжения, или уменьшение времени разрушения. Таким образом, коэффициент разности накопленной энергии между компонентами позволяет оценить склонность УПТ к горному удару.

Коэффициент η также отражает механизм горного удара в условиях добычи на большой глубине, когда угольный массив накапливает большее количество энергии и доля накопленной энергии превышает долю накопленной энергии в породном массиве. В результате увеличивается разность $U_c - U_r$ и система “уголь – порода” становится менее устойчивой и более склонной к ударным катастрофическим явлениям. С другой стороны, при большой глубине угледобычи происходит быстрое увеличение напряжения в системе “уголь – порода”. Согласно результатам

предыдущих исследований, продолжительность горных ударов на малой глубине обычно более существенно, чем на большой, т. е. DT на большой глубине имеет меньшее значение. Представленный анализ показывает, что при увеличении глубины угледобычи происходит значительное повышение напряжения в системе “уголь – порода” и уголь накапливает большее количество энергии, тем самым повышая долю накопленной энергии. Угольный компонент играет главную роль в ударном разрушении системы. Под влиянием динамических факторов, нарушающих устойчивость, на большой глубине повышается вероятность горного удара и его интенсивность.

ВЫВОДЫ

На основе данных о распределении энергии в системе “уголь – порода” выполнен анализ разницы накопленной энергии между угольным и породным компонентами. Разница накопленной энергии получена экспериментально при разных значениях скорости нагружения; выведена расчетная формула. Согласно энергетической модели неустойчивости угольно-породного тела, проведена оценка деформации системы “уголь – порода”, а также предложен коэффициент склонности системы к горному удару. В результате настоящей работы получены следующие выводы:

- при одинаковом уровне напряжений разница накопленной энергии в основном зависит от модуля упругости угля и породы и увеличивается с уменьшением модуля упругости угля. Уголь является основным компонентом, накапливающим энергию в системе “уголь – порода”;
- построена и проанализирована механическая модель угольно-породного тела. На основе полученной кривой “напряжение – деформация” использован более точный метод определения накопленной энергии в компонентах;
- породный компонент повышает прочность на сжатие угольно-породного тела. Прочность угольно-породного тела на сжатие чувствительна к изменению скорости нагружения. При увеличении скорости нагружения накопленная энергия плавно увеличивается до максимального значения. Чем больше скорость нагружения, тем меньше устойчивость УПТ;
- угольный компонент является основным носителем накопленной энергии. При увеличении скорости нагружения накопленная энергия в угольном компоненте, доля накопленной энергии и разница накопленной энергии между компонентами увеличиваются. Разница накопленной энергии между компонентами в значительной мере влияет на характер разрушения УПТ;
- согласно теории диссипативных структур, предложена энергетическая модель УПТ, в рамках которой рассмотрен процесс перехода УПТ от устойчивого равновесного состояния к неустойчивому равновесному состоянию, а затем к новому устойчивому равновесному состоянию;
- предложен коэффициент склонности УПТ к удару на основе разницы энергии и времени ее высвобождения, который не только учитывает внутренние структурные характеристики и механические свойства угля и породы, но и внешние условия (уровень напряжения), а также время разрушения УПТ. Он позволяет прогнозировать склонность угольно-породного тела к горному удару на разных масштабных уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qian M., Xu J., and Wang J. Further on the sustainable mining of coal, J. China Coal Soc., 2018, Vol. 43, No. 1. — P. 1–13.

2. **Wang J.** Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China, *J. China Coal Soc.*, 2018, Vol. 43, No. 1. — P. 43–51.
3. **Xie H. P.** Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory, *J. China Coal Soc.*, 2019, Vol. 44, No. 5. — P. 1283–1305.
4. **Chen S. J., Yin D. W., Zhang B. L., Ma H. F., and Liu X. Q.** Study on mechanical characteristics and progressive failure mechanism of roof-coal pillar structure body, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2017, Vol. 36, No. 7. — P. 1588–1598.
5. **Qi Q. X., Shi Y. W., and Liu T. Q.** Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst, *J. China Coal Soc.*, 1997, Vol. 22, No. 2. — P. 34–38.
6. **Qi Q. X., Peng Y. W., Li H. Y., Li J., Wang Y. and Li C.** Study of bursting liability of coal and rock, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2011, Vol. 30, No. S1. — P. 2736–2742.
7. **Xiao X. C., Fan Y. F., Wu D., Ding X., Wang L., and Zhao B.** Energy dissipation feature and rock burst risk assessment in coal–rock combined bodies, *Rock and Soil Mech.*, 2019, Vol. 40, No. 11. — P. 4203–4219.
8. **Xue J. H., Chen Z. H., Li Y. H., Wang J, and Li X.** Failure characteristics of coal-rock combined bodies based on acoustic emission signals, *Arabian J. Geosciences*, 2022, Vol. 15, No. 2. — P. 1–10.
9. **Chen Y., Zuo J. P., Wei X., Song H., and Sun Y.** Energy nonlinear evolution characteristics of the failure behavior of coal–rock combined body, *Chin. J. Undergr. Sp. Eng.*, 2017, Vol. 13, No. 1. — P. 124–132.
10. **Zuo J. P., Song H. Q., Chen Y., et al.** Post-peak progressive failure characteristics and nonlinear model of coal–rock combined body, *J. China Coal Soc.*, 2018, Vol. 43, No. 12. — P. 3265–3272.
11. **Song H. Q., Zuo J. P., Chen Y., and Li L.** Post-peak stress-strain relationship model and brittle characteristics of coal-rock combined body, *J. Min. and Safety Eng.*, 2018, Vol. 43, No. 12. — P. 3265–3272.
12. **Chen G. B., Li T., Yang L., Zhang G. H., Li J. W., and Dong H. J.** Mechanical properties and failure mechanism of combined bodies with different coal-rock ratios and combinations, *J. Min. and Strata Control Eng.*, 2021, Vol. 3(2). — P. 84–94.
13. **Du F., Wang K., Dong X. L., et al.** Numerical simulation of damage and failure of coal-rock combined body based on CT three-dimensional reconstruction, *J. China Coal Soc.*, 2021, Vol. 46, No. S1. — P. 253–262.
14. **Zhao Y. C., Gao M. S., He Y. L., and Xu D.** Failure mechanism of a coal–rock combined body with inclinations of structural planes and a calculation model for impact energy, *Advances in Civil Eng.*, 2019, 2019(5). — P. 1–18.
15. **Chen S. J., Yin D. W., Jiang N., et al.** Energy mechanism of rock burst in the rock-coal combined body, 9th China-Russia Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection”, 2018.
16. **Liu W. R., Yuan W., Yan Y. T., and Wang X.** Analysis of acoustic emission characteristics and damage constitutive model of coal-rock combined body based on particle flow code, *Symmetry*, 2019, Vol. 11, No. 8. — P. 1040.
17. **Chen Y., Zuo J., Liu D., and Wang Z.** Deformation failure characteristics of coal–rock combined body under uniaxial compression: experimental and numerical investigations, *Bull. Eng. Geology and the Env.*, 2018b, Vol. 78, No. 5. — P. 3449–3464.
18. **Du F., Wang K., Wang G. D., Jiang Y., Xin C., and Zhang X.** Investigation of the acoustic emission characteristics during deformation and failure of gas–bearing coal–rock combined bodies, *J. Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, Vol. 55, No. 9. — P. 253–266.

19. **Gong F., Ye H., and Luo Y.** The effect of high loading rate on the behaviour and mechanical properties of coal–rock combined body, Shock and Vibration, 2018, 2018(6). — P. 1–9.
20. **Zuo J. P. and Song H. Q.** Study on energy evolution law and differential energy instability model of coal–rock combined body, J. China Coal Soc. — P. 1–16.
21. **Liu J. X., Tang C. A., Zhu W. C., and Yang T.-H.** Rock-coal model for studying the rock burst, Chin. J. Geotechnical Eng., 2004, Vol. 26, No. 2. — P. 276–280.
22. **Chen G. B., Qin Z. C., Zhang G. H., et al.** Law of energy distribution before failure of a loaded coal–rock combined body, Rock and Soil Mech., 2020, Vol. 41(6). — P. 2021–2033.
23. **Yin D. W., Chen S. J., Xing W. B., Huang D., and Liu X.** Experimental study on mechanical behavior of roof–coal pillar structure body under different loading rates, J. China Coal Soc., 2018, Vol. 43, No. 5. — P. 1249–1257.
24. **Zuo J. P., Xie H. P., Meng B. B., et al.** Experimental research on loading-unloading behavior of coal–rock combined body bodies at different stress levels, Rock and Soil Mech., 2011, Vol. 32, No. 5. — P. 1287–1296.
25. **Chen G. B., Wang E. Y., Wang W. C., Li T., and Zhang G.** Experimental study on the influence of lithology and rock–coal height ratio on mechanical properties and impact effect of combined body, Energy Sources, Part A, Recovery, Utilization and Env. Effects, 2019, Vol. 6. — P. 1–24.

Поступила в редакцию 09/X 2023

После доработки 1/IX 2024

Принята к публикации 24/IX 2024