

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 2

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ
И ОТНОСИТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЧНОСТИ
УГОЛЬНО-ПОРОДНОГО ОБРАЗЦА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Цай Жунхуань¹, Пань Ишань^{1,2}, Сяо Юнхуэй³, Лю Фэйюй¹

¹Северо-восточный университет,

E-mail: panyish_cn@sina.com, 110819, г. Шэньян, Китай

²Институт аварийной геомеханики, Ляонинский университет, 110036, г. Шэньян, Китай

³Ляонинский университет, 110036, г. Шэньян, Китай

Выполнено одноосное сжатие комбинированных угольно-породных образцов с тремя различными значениями относительного коэффициента прочности при четырех значениях скорости нагружения с целью определения влияния указанных параметров на механические свойства образцов. Относительный коэффициент прочности λ представляет собой отношение прочности на сжатие породы к соответствующей прочности угля. Показано, что при изменении скорости нагружения на механические свойства оказывает влияние как более прочный, так и менее прочный компоненты образца. Пиковое напряжение и модуль упругости в основном определяются менее прочным компонентом, а пиковая деформация — обаими компонентами. Соотношение между пиковой деформацией и скоростью нагружения зависит от прочности менее прочной составляющей. На соотношение между механическими свойствами и относительным коэффициентом прочности λ скорость нагружения не влияет. Менее прочный компонент в комбинированном образце угля и породы является основным разрушающимся элементом, и чем больше значение λ , тем более выражено разрушение этого компонента. При увеличении λ характер разрушения изменяется от разрушения обоих компонентов к разрушению только менее прочного.

Комбинированный угольно-породный образец, относительный коэффициент прочности, механические свойства, характеристики разрушения

DOI: 10.15372/FTPRPI20240202

EDN: OQPMJB

В связи с увеличением глубины и интенсивности угледобычи в Китае проблема горных ударов становится все более острой. Частота горных ударов увеличивается, и они постепенно становятся одними из основных катастрофических явлений при эксплуатации глубоких шахт [1–5]. В результате постепенного истощения угольных запасов в центральных и восточных регионах Китая текущим трендом в сфере угледобычи стала разработка месторождений западных регионов [6]. В последние годы началась крупномасштабная разработка угольных месторождений

Работа выполнена в рамках Национальной научно-исследовательской программы Китая (№ проекта 2022YFC3004605) и Национального фонда естественных наук Китая (№ проекта 52104087).

в регионе Ордос, где из-за увеличения горнодобывающих работ в некоторых шахтах начали происходить горные удары. В этой части района наблюдаются сложные геологические условия, характеризующиеся слабоконсолидированными налагающими породами, высокой прочностью угля и значительными изменениями литологических свойств кровли. С литологической точки зрения прочность большей части кровли меньше прочности угольного пласта. Это в значительной мере отличается от обычных геологических условий, когда прочность кровли выше прочности пласта. Динамические катастрофические явления, в частности горные удары, приводят к общему обрушению кровельных структур в процессе отработки месторождения [7]. Изменение скорости подвигания фронта забоя в лабораторных условиях можно моделировать путем изменения скорости нагружения образцов породы и угля [8]. Изучение влияния литологических изменений на механические свойства углепородного материала при различных значениях скорости нагружения обладает практической значимостью, так как позволяет получить теоретические основания для прогнозирования и предотвращения горных ударов.

За последние годы проведено большое количество исследований по изучению угольно-породных материалов и получены интересные результаты. В [9] выполнено одноосное сжатие комбинированных образцов угля и породы при малых скоростях нагружения, выявлена зависимость ударного разрушения образца от скорости нагружения, определена критическая скорость нагружения, а также установлено, что механические свойства образца отличаются от критической скорости нагружения. В [10] выявлена зависимость механических свойств комбинированных образцов угля и породы от скорости нагружения и содержания влаги. В [11] получены зависимости формирования микродефектов, пикового напряжения, модуля упругости и других свойств угольно-породных образцов от скорости нагружения. Влияние скорости нагружения на параметры акустической эмиссии в процессе разрушения угольно-породных образцов рассмотрено в [12], установлены три основных характера разрушения и определена тенденция к ударному разрушению. В [13] исследованы распределения трещин и их характеристики, рассмотрены механизмы разрушения трех разных угольно-породных образцов при различных скоростях нагружения.

В [14] выполнено одноосное сжатие угольно-породных образцов при различных скоростях нагружения, определены пиковая прочность, пиковая деформация и энергетические параметры, которые подтверждены численными расчетами. В [15, 16] проанализировано влияние прочности породы, входящей в состав угольно-породного образца, на его механические свойства и характеристики разрушения. В [17] рассмотрено влияние относительного коэффициента прочности угольно-породного образца на его механические свойства и на изменение распределения энергии. Показано [18], что относительный коэффициент прочности угольно-породного образца значительным образом влияет на механические свойства и энергетические характеристики. Проанализирована неустойчивость угольно-породного образца с энергетической точки зрения и установлен закон рассеивания энергии при разрушении [19]. Изучено изменение энергетических параметров угольно-породного образца при циклическом нагружении [20]. В [21] в результате однократного и циклического нагружений комбинированного угольно-породного образца в целом и каждого из его компонентов в отдельности дан анализ изменения сообщаемой системы энергии, энергии упругой деформации, рассеянной энергии и механических свойств, в результате чего установлен механизм преобразования энергии при разрушении угольно-породного образца. В [22] рассмотрено влияние толщины угольного слоя в угольно-породном образце на его механические и энергетические характеристики. В [23] проведен анализ двух независимых угольно-породных образцов с разными литологическими свойствами и соотношениями угля и породы, исследован механизм накопления энергии в системе “поро-

да – уголь” и определен уровень накопленной энергии для инициации горного удара. В работах [24, 25] рассмотрены вопросы влияния водонасыщения на физико-механические свойства углепородного массива.

В приведенных исследованиях в основном рассмотрены комбинированные угольно-породные образцы, в которых менее прочным (“слабым”) является угольный компонент. ПРИМЕНИМОСТЬ полученных результатов к ситуации, когда угольная компонента прочнее породной, неочевидна. Общие геологические условия пород региона соответствуют слабоконсолидированным налегающим породам и высокой прочности угля в пласте, а также значительным изменениям литологических свойств в кровле. В этой связи необходимы дальнейшие исследования.

Цель настоящей работы — получение экспериментальных данных и разработка теоретических основ для прогноза и предотвращения горных ударов, а также для увеличения эффективности добычи угля. Для описания комбинированных угольно-породных образцов вводится параметр относительной прочности λ , который определяется как отношение прочности на сжатие образца породы к прочности на сжатие образца угля при одноосном сжатии. Выполнено одноосное сжатие комбинированных угольно-породных образцов со значениями относительного коэффициента прочности $\lambda = 0.35, 1.20$ и 3.81 при скоростях нагружения $0.005, 0.01, 0.02$ и 0.05 $\text{мм}/\text{с}$ с целью уточнения соотношений между механическими свойствами образцов, скоростью нагружения и относительным коэффициентом прочности λ . Проанализировано влияние скорости нагружения и относительного коэффициента прочности на пиковое напряжение, модуль упругости, пиковую деформацию и характеристики разрушения угольно-породных образцов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов. Для проведения экспериментальных исследований образцы угля взяты из угольной шахты, расположенной во Внутренней Монголии, а образцы породы с различными литологическими свойствами — из кровельных пород трех разных шахт, расположенных во Внутренней Монголии, пров. Хэбэй и пров. Ляонин. Образцы угля получены из больших блоков, а образцы породы — посредством кернового бурения. Согласно действующим стандартам, образцы угля и породы имеют форму цилиндров с диаметром 50 мм и высотой 50 и 100 мм . Также выполнено шлифование торцевых поверхностей образцов для достижения максимальной амплитуды отклонения по высоте, не превышающей 0.02 мм . Образцы угля и образцы породы соединены друг с другом с помощью эпоксидной смолы АВ [26, 27] для получения комбинированных образцов стандартного размера $\varnothing 50 \times 100$ мм (рис. 1).



Рис.1. Комбинированные угольно-породные образцы

Оборудование и порядок проведения экспериментальных исследований. Использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина с микрокомпьютерным управлением WDW-300E. Общий вид установки показан на рис. 2. Для определения механических свойств угля и породы в отдельности выполнено сжатие образцов угля и породы при скорости нагружения 0.02 мм/с. Результаты показали, что прочность образца угля на одноосное сжатие составила 30.73 МПа, прочность образцов породы с тремя различными литологическими свойствами — 10.87, 36.90 и 116.95 МПа соответственно. Модуль упругости угля 1.45 ГПа, а образцов породы 1.65, 4.08 и 20.84 ГПа. Таким образом получены комбинированные образцы угля и породы трех типов с соответствующими значениями относительного коэффициента прочности λ : 0.35, 1.20 и 3.81. Затем проведены испытания трех групп образцов (по значениям λ) на сжатие при следующих значениях скорости нагружения: 0.005, 0.010, 0.020 и 0.05 мм/с. Для минимизации ошибки, связанной с разбросом данных образцов, каждое испытание выполнено от 3 до 4 раз.

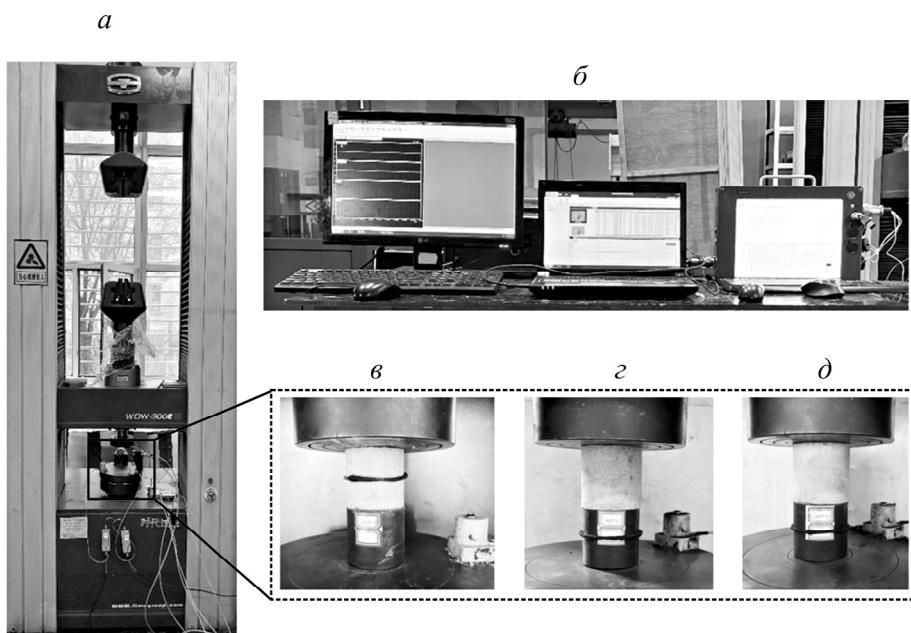


Рис. 2. Установка для экспериментальных исследований: *а* — испытательная машина; *б* — измерительные системы; *в* — $\lambda = 0.35$; *г* — $\lambda = 1.20$; *д* — $\lambda = 3.81$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кривые “напряжение–деформация”. На рис. 3 представлены кривые “напряжение–деформация” угольно-породных образцов при различных скоростях нагружения. Видно, что кривые трех типов образцов несколько отличаются друг от друга, однако общий тренд их изменения в основном совпадает. Анализ полученных кривых позволяет выделить четыре стадии нагружения: начального уплотнения, упругой деформации, пластической деформации и постпиковового разрушения. Общий характер развития кривых, за исключением незначительного различия в значениях механических параметров, не зависит от скорости нагружения.

Зависимость механических свойств от скорости нагружения. Результаты испытаний образцов на сжатие при различных скоростях нагружения показаны в табл. 1. На рис. 4а приведена зависимость пикового напряжения от скорости нагружения. Видно, что при увеличении скорости в образце с коэффициентом $\lambda = 0.35$ пиковое напряжение сначала увеличивается, затем снижается, а потом снова увеличивается.

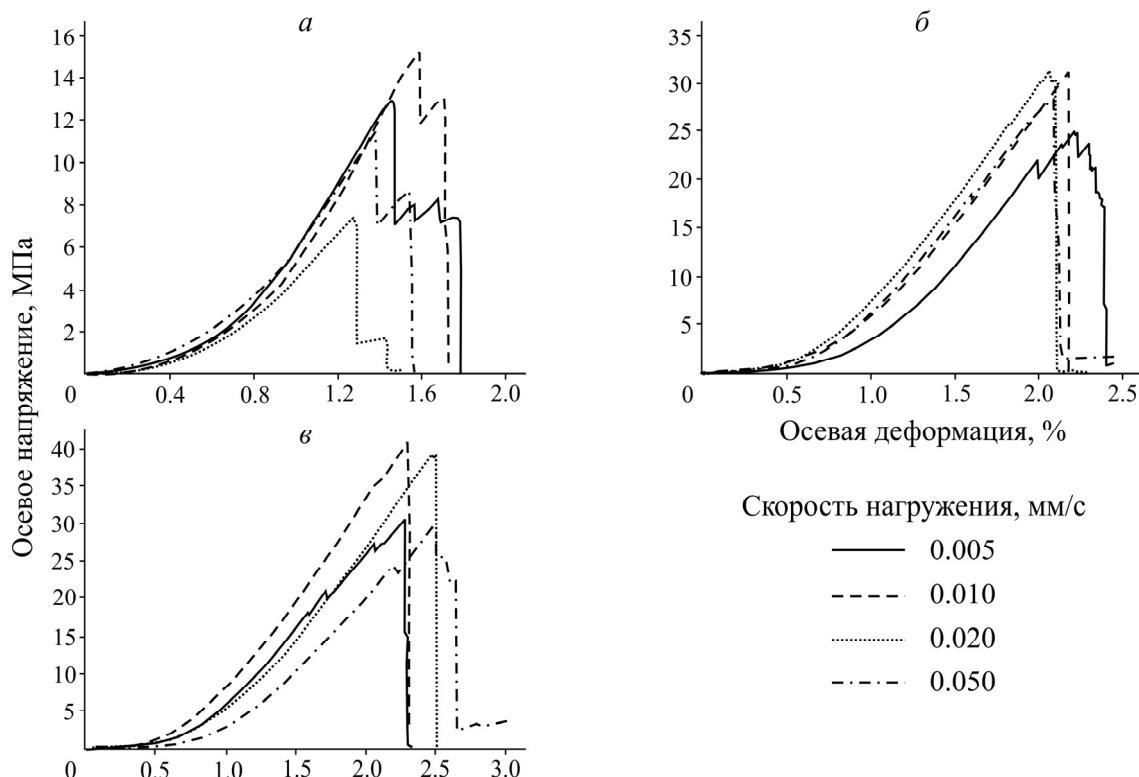


Рис. 3. Кривые “напряжение – деформация” для образцов с различными значениями относительного коэффициента прочности λ : 0.35 (а); 1.20 (б); 3.81 (в)

Для образцов с $\lambda = 1.20$ и 3.81 пиковое напряжение имеет одинаковый характер изменения: сначала рост, затем снижение. При этом скорость нагружения достигает максимума пиковой нагрузки 0.01 мм/с. При увеличении скорости нагружения с 0.005 до 0.01 мм/с рост пикового напряжения составил от 26.85 до 33.37 МПа и от 35.24 до 40.19 МПа, что равно соответственно 24.28 и 14.05 %. Дальнейшее увеличение скорости нагружения от 0.01 до 0.05 мм/с приводит к снижению пикового напряжения с 33.37 до 28.84 МПа и с 40.19 до 33.03 МПа соответственно, т. е. на 13.58 и 17.82 %. Из табл. 1 и рис. 4а видно, что на отметке скорости нагружения 0.01 все три группы образцов достигают максимального пикового напряжения (13.40 , 33.37 и 40.19 МПа при $\lambda = 0.35$, 1.20 и 3.81 соответственно).

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний угольно-породных образцов на одноосное сжатие

λ	Скорость нагружения, $\text{мм} \cdot \text{с}^{-1}$	Пиковое напряжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Пиковая деформация, %
0.35	0.005	11.86	1.35	1.53
	0.010	13.40	1.43	1.55
	0.020	9.29	1.08	1.43
	0.050	10.98	1.24	1.45
1.20	0.005	26.85	2.26	2.03
	0.010	33.37	2.40	2.24
	0.020	31.91	2.34	2.17
	0.050	28.84	2.19	2.09
3.81	0.005	35.24	2.47	2.25
	0.010	40.19	2.61	2.36
	0.020	39.00	2.57	2.34
	0.050	33.03	2.37	2.47

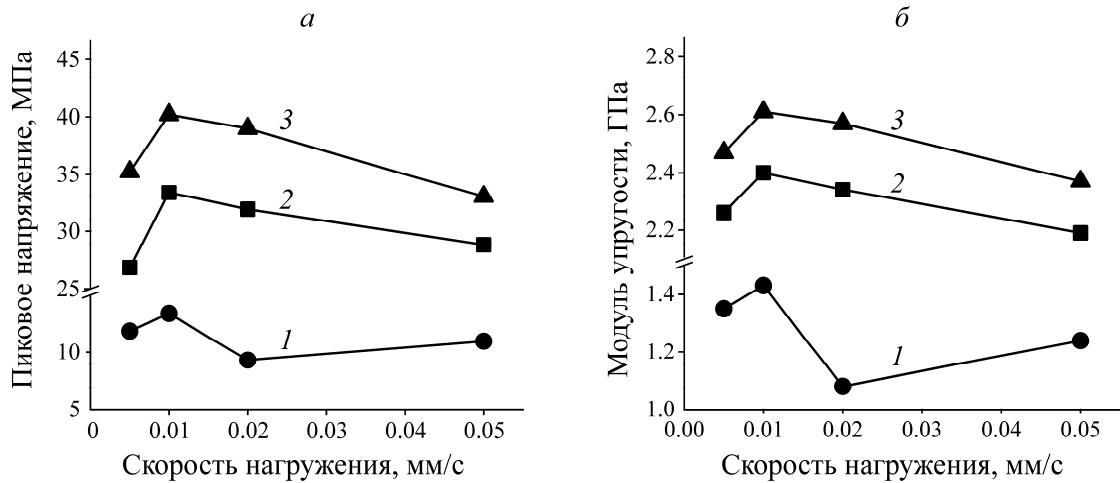


Рис. 4. Зависимость пикового напряжения (а) и модуля упругости (б) от скорости нагружения при $\lambda=0.35$ (1), 1.20 (2), 3.81 (3)

Минимальные значения пикового напряжения приходятся на разные скорости нагружения в зависимости от коэффициента прочности образцов. Они составили 9.29, 26.85 и 33.03 МПа при $\lambda=0.35$, 1.20 и 3.81 и скорости нагружения 0.02, 0.005 и 0.05 мм/с соответственно. Установлено, что если “слабые” компоненты одинаковы, то характер изменения пикового напряжения в зависимости от скорости нагружения тоже будет одинаковым; если же “слабые” компоненты различаются, то и характер изменения пикового напряжения в зависимости от скорости нагружения тоже будет различаться. При одинаковых “слабых” компонентах скорость нагружения, при которой достигаются минимумы пиковых напряжений, различается, также различается амплитуда изменения соответствующих пиковых напряжений при одинаковом изменении скорости нагружения. Полученные данные показывают, что зависимость пикового напряжения угольно-породного образца от скорости нагружения определяется как более прочным (“сильным”), так и менее прочным (“слабым”) компонентом, но в основном именно “слабым”.

Зависимость модуля упругости от скорости нагружения показана на рис. 4б. Модуль упругости представляет собой тангенс угла наклона кривой “напряжение – деформация” на стадии упругой деформации. Видно, что изменение модуля упругости согласуется с изменением пикового напряжения. При значении $\lambda=0.35$ явная закономерность изменения модуля упругости при увеличении скорости нагружения не выявлена. Для групп образцов с коэффициентами $\lambda=1.20$ и 3.81 определена критическая скорость нагружения, при которой модуль упругости максимален, как и ранее она составила 0.01 мм/с. При росте скорости нагружения от 0.005 до 0.01 мм/с наблюдается увеличение модуля упругости соответственно с 2.26 до 2.40 ГПа ($\lambda=1.20$) и с 2.47 до 2.61 ГПа ($\lambda=3.81$). Это составило 6.19 и 5.67 % соответственно. При дальнейшем увеличении скорости нагружения от 0.01 до 0.05 мм/с модуль упругости снижается с 2.40 до 2.19 ГПа или на 8.75 % ($\lambda=1.20$) и соответственно с 2.61 до 2.37 ГПа или на 9.20 % ($\lambda=3.81$).

Из табл. 1 и рис. 4б следует, что модуль упругости достигает своего максимального значения для всех трех групп образцов при скорости нагружения 0.01 мм/с (1.43, 2.40 и 2.61 ГПа при $\lambda=0.35$, 1.20 и 3.81 соответственно). Минимальное значение модуля упругости наблюдалось при разных значениях скорости нагружения в зависимости от коэффициента λ . Так, при $\lambda=0.35$ ми-

нимальное значение модуля упругости составило 1.08 ГПа при скорости нагружения 0.02 мм/с, а при $\lambda=1.20$ и 3.81 минимальные значения модуля достигнуты при скорости 0.005 мм/с и составили 2.19 и 2.37 ГПа соответственно. Исходя из этого, можно сделать такой же вывод, как в случае с пиковым напряжением: зависимость модуля упругости угольно-породного образца от скорости нагружения определяется как “сильным”, так и “слабым” компонентом, но в большей степени именно “слабым”.

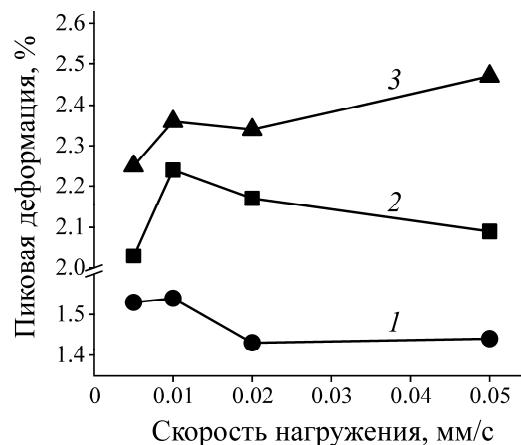


Рис. 5. Зависимость пиковой деформации от скорости нагружения при $\lambda=0.35$ (1), 1.20 (2), 3.81 (3)

Из рис. 5 видно, что зависимость пиковой деформации от скорости нагружения для трех групп образцов отличается как от пикового напряжения, так и от модуля упругости. Общий тренд зависимости для трех групп образцов различен. При $\lambda=0.35$ пиковая деформация с ростом скорости нагружения сначала остается практически неизменной (на скоростях нагружения до 0.01 мм/с), затем снижается (на скоростях от 0.01 до 0.02 мм/с) и снова выходит на постоянное значение (на скоростях выше 0.02 мм/с). При значении $\lambda=1.20$ пиковая деформация сначала увеличивается, а потом уменьшается; она достигает максимального значения 2.24% на отметке скорости 0.01 мм/с, в то время как на отметке 0.005 мм/с она составляла 2.03 %. При $\lambda=3.81$ с увеличением скорости нагружения пиковая деформация меняется немонотонно: сначала увеличивается, потом уменьшается, а затем снова увеличивается. Максимум пиковой деформации 2.47% достигается при скорости нагружения 0.05 мм/с, а минимум 2.25% — на отметке скорости 0.005 мм/с. Зависимость пиковой деформации от скорости нагружения определяется в равной мере как “слабым”, так и “сильным” компонентом комбинированного угольно-породного образца.

Суммируя изложенное, можно сделать вывод, что зависимость механических свойств комбинированного образца угля и породы от скорости нагружения определяется обоими его компонентами (“сильным” и “слабым”). Пиковое напряжение и модуль упругости зависят в основном от “слабого” компонента, а пиковая деформация — как от “сильного”, так и от “слабого” компонента.

Зависимость механических свойств от относительного коэффициента прочности λ . На рис. 6 видно, что при разных скоростях нагружения пиковое напряжение имеет одинаковый тренд изменения с ростом λ , т. е. сначала резкое, а затем плавное увеличение. Рассмотрим в качестве примера значение скорости нагружения 0.02 мм/с. В этом случае при увеличении λ от 0.35 до 1.20 пиковое напряжение увеличивается с 9.29 до 31.91 МПа или на 243.49 %; при увеличении λ от 1.20 до 3.81 оно увеличивается с 31.91 до 39 МПа, т. е. на 22.22 %. Таким образом, пиковое напряжение образца резко растет при увеличении прочности “слабого” компонента, а при увеличении прочности “сильного” компонента — растет постепенно.

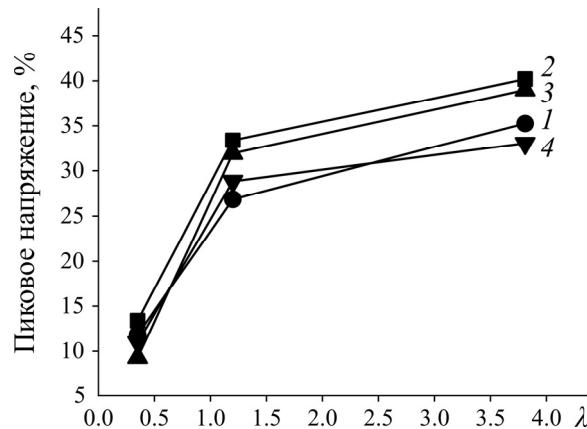


Рис. 6. Зависимость пикового напряжения от коэффициента прочности λ при разных скоростях нагружения, мм/с: 0.005 (1), 0.010 (2), 0.020 (3), 0.050 (4)

Как следует из рис. 6, при различных скоростях нагружения изменение пикового напряжения с ростом λ качественно не меняется (отличаются только абсолютные значения величин). На рис. 7 показано, как меняется амплитуда пикового напряжения при разных значениях скорости нагружения для различных групп образцов.

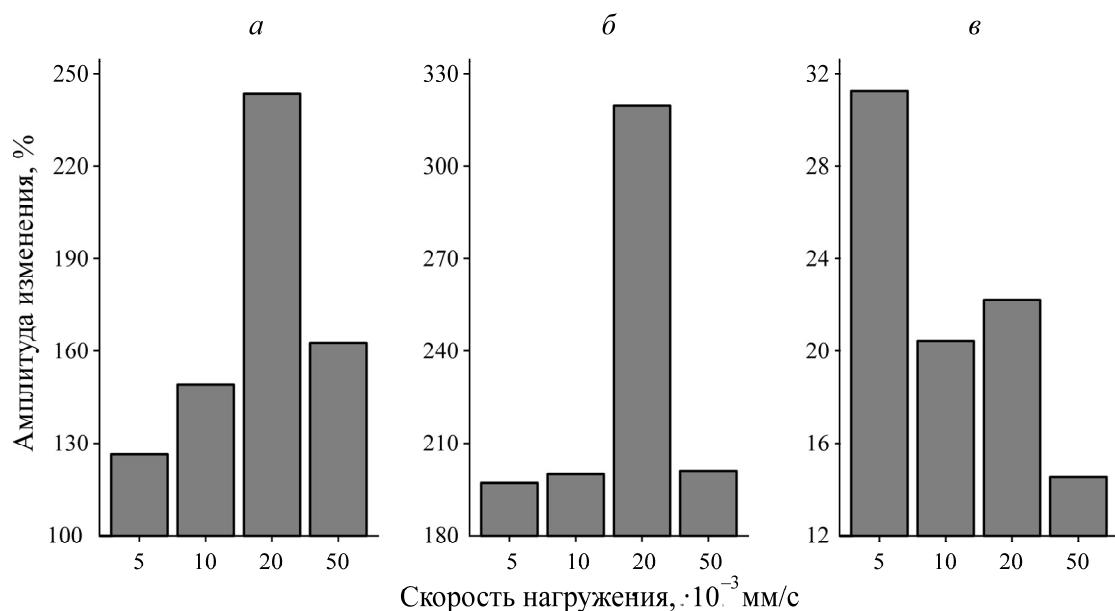


Рис. 7. Зависимость амплитуды изменения пикового напряжения от скорости нагружения при изменении λ : 0.35 → 1.20 (а); 0.35 → 3.81 (б); 1.20 → 3.81 (в)

Видна явная зависимость амплитуды пикового напряжения от скорости нагружения при одном и том же λ . Так, при увеличении λ от 0.35 до 1.20 изменение амплитуды пикового напряжения сначала растет, затем снижается при увеличении скорости нагружения. Наименьшее увеличение амплитуды зафиксировано на скорости 0.005 мм/с, а наибольшее — на скорости 0.02 мм/с. При увеличении λ от 0.35 до 3.81 общий характер амплитуды практически не меняется, отличается только величина ее изменения на скорости нагружения 0.02 мм/с. При увеличении λ от 1.20 до 3.81 и при постоянном росте скорости нагружения наблюдается сначала рост амплитуды пикового напряжения, затем снижение, а далее снова небольшой рост и опять

снижение. Наибольшее увеличение амплитуды зафиксировано на отметке скорости нагружения 0.005 мм/с, наименьшее — на отметке 0.05 мм/с. В целом явная закономерность изменения амплитуды не выявляется. Можно заключить, что увеличение амплитуды пикового напряжения при одинаковом изменении λ зависит от скорости нагружения и характер этого влияния меняется в зависимости от изменения λ .

На рис. 8 показана зависимость модуля упругости от относительного коэффициента прочности λ . Данная зависимость согласуется с картиной изменения пикового напряжения (см. рис. 6). При различных скоростях нагружения модуль упругости образца имеет одинаковый характер изменения с ростом λ , т. е. вначале резкий, а затем плавный рост. Рассмотрим, например, скорость нагружения 0.02 мм/с. В этом случае при увеличении λ от 0.35 до 1.20 модуль упругости увеличивается с 1.08 до 2.34 ГПа (на 116.67 %); при увеличении λ от 1.20 до 3.81 пиковое напряжение увеличивается с 2.34 до 2.57 ГПа (на 9.83 %). Иными словами, с ростом λ модуль упругости становится менее чувствителен к его изменению.

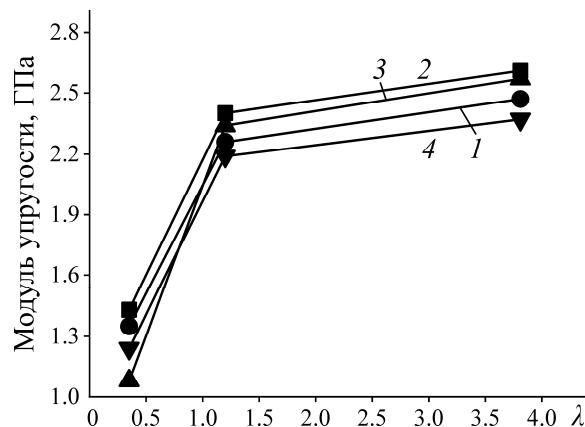


Рис. 8. Зависимость модуля упругости от относительного коэффициента прочности λ при разных скоростях нагружения, мм/с: 0.005 (1), 0.010 (2), 0.020 (3), 0.050 (4)

На рис. 9 приведено сравнение амплитуды изменения модуля упругости относительно различных скоростей нагружения при одинаковом изменении λ .

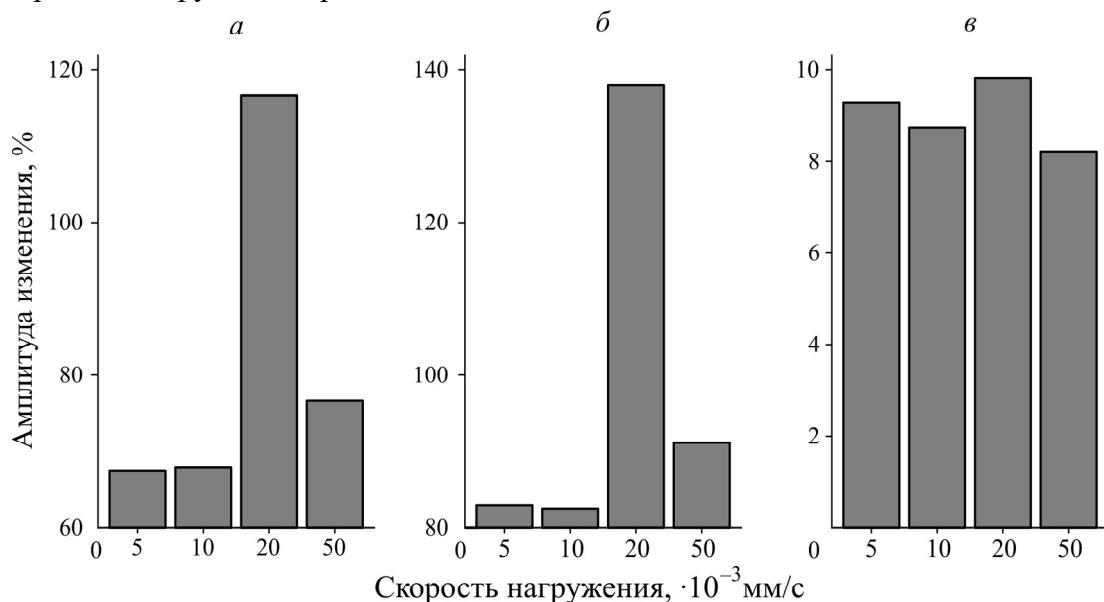


Рис. 9. Зависимость амплитуды изменения модуля упругости от скорости нагружения при изменении λ : 0.35 → 1.20 (а); 0.35 → 3.81 (б); 1.20 → 3.81 (в)

При условии одинакового подхода к анализу модуля упругости и пикового напряжения характер изменения их амплитуд также одинаковый: амплитуда изменения модуля упругости при одинаковом изменении λ в значительной степени зависит от скорости нагружения, и эта зависимость различна при различном характере изменения λ .

Зависимость пиковой деформации от относительного коэффициента прочности λ представлена на рис. 10. Видно, что характер изменения пиковой деформации совпадает с характером изменения пикового напряжения и модуля упругости: сначала резкое увеличение, а затем плавное. Так, для скорости нагружения 0.02 мм/с увеличение λ с 0.35 до 1.20 приводит к увеличению пиковой деформации от 1.43 до 2.17 % (на 51.75%); увеличение λ с 1.20 до 3.81 влечет рост пикового напряжения от 2.17 до 2.34 % (на 7.83 %).

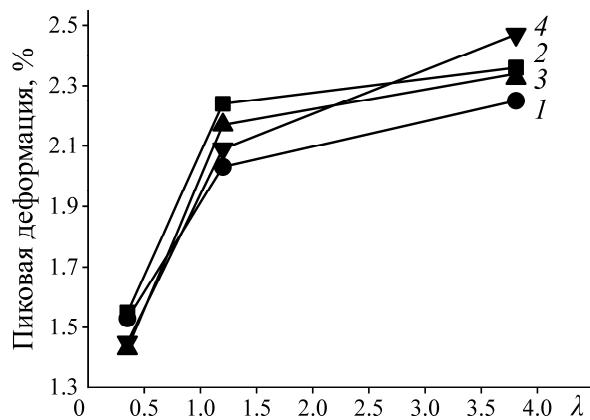


Рис. 10. Зависимость пиковой деформации от относительного коэффициента прочности λ при различных скоростях нагружения, мм/с: 0.005 (1), 0.010 (2), 0.020 (3), 0.050 (4)

На рис. 11 показано сравнение амплитуды изменения пиковой деформации относительно скорости нагружения при одинаковом характере изменения параметра λ . При условии одинакового подхода к анализу пиковой деформации и пикового напряжения характер изменения их амплитуд не меняется: амплитуда изменения пиковой деформации в значительной степени зависит от скорости нагружения, и эта зависимость различна при различном изменении λ .

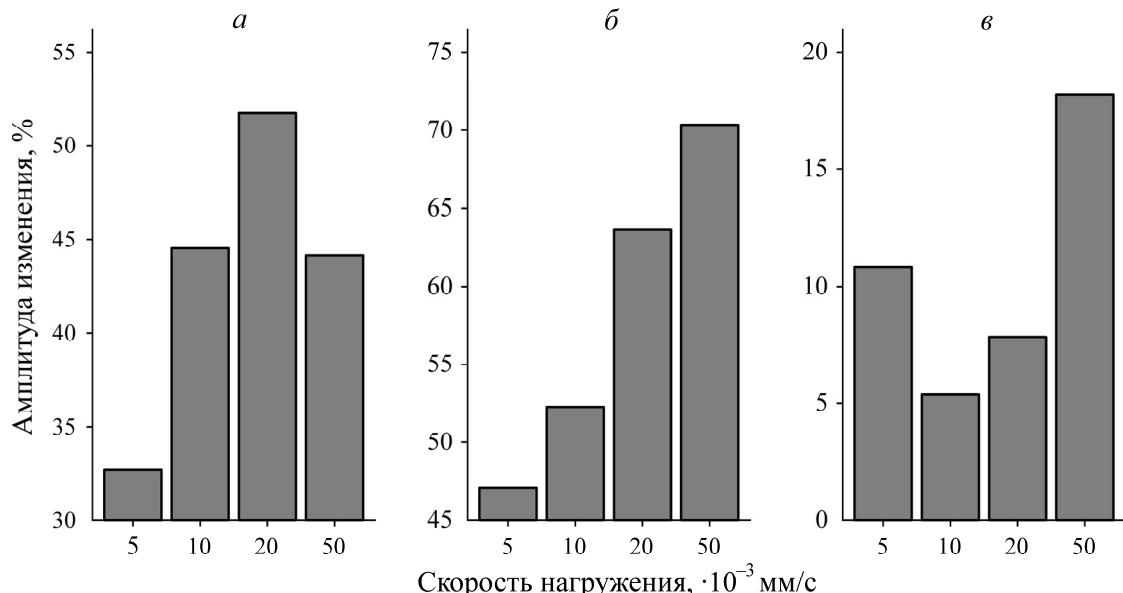


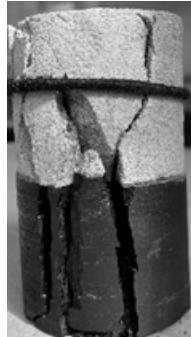
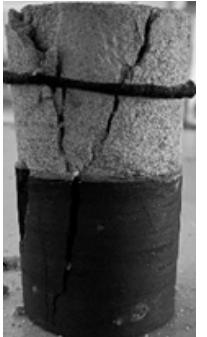
Рис. 11. Зависимость амплитуды изменения пиковой деформации от скорости нагружения при изменении λ : 0.35 → 1.20 (а); 0.35 → 3.81 (б); 1.20 → 3.81 (в)

Таким образом, можно сделать вывод, что скорость нагружения не оказывает влияния на зависимость механических свойств комбинированного угольно-породного образца от относительного коэффициента прочности λ . При различных значениях скорости нагружения с ростом λ механические свойства образца увеличиваются сначала резко, а затем плавно. Однако амплитуда изменения механических свойств с ростом λ в значительной степени зависит от скорости нагружения, и эта зависимость отличается при различном характере изменения λ .

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В табл. 2 показано разрушение различных угольно-породных образцов. При значении коэффициента относительной прочности $\lambda=0.35$ степень повреждения породы больше степени повреждения угля. Здесь порода — основной разрушающий компонент.

ТАБЛИЦА 2. Типичный характер разрушения угольно-породных образцов

λ	Скорость нагружения, мм/с			
	0.005	0.010	0.020	0.050
0.35				
1.20				
3.81				

Очевидно, что образец породы разрушается сдвигом, а образец угля имеет только трещины растяжения, образованные в результате разрушения породного компонента, и не имеет явных признаков разрушения. При коэффициенте прочности $\lambda = 1.20$ степень повреждения угля больше степени повреждения породы, т. е. основной разрушающийся компонент — уголь. Образец угля разрушается сдвигом с формированием одиночной наклонной плоской трещины, а образец породы имеет повреждения по типу растяжения, которые вызваны разрушением образца угля. При коэффициенте прочности 3.81 разрушение происходит в образце угля также сдвигом с формированием одиночной наклонной плоской трещины, и степень его разрушения значительно больше, чем при $\lambda = 1.20$. В этом случае образец породы не имеет видимых трещин, т. е. основной разрушающийся компонент — уголь. Скорость нагружения не оказывает значительного влияния на характер разрушения ввиду своего относительно малого различия.

Таким образом, “слабый” компонент угольно-породного образца является основным разрушающимся компонентом. Чем больше значение λ , тем значительнее разрушение “слабого” компонента. При увеличении λ характер разрушения постепенно смещается от обоюдного разрушения “слабого” и “сильного” компонентов к разрушению только “слабого” компонента.

ВЫВОДЫ

Механические свойства комбинированного образца угля и породы определяются как более прочным, так и менее прочным компонентами. Пиковое напряжение и модуль упругости в основном зависят от менее прочного компонента, а пиковая деформация — от обоих. При одинаковом менее прочном компоненте зависимость пикового напряжения и модуля упругости от скорости нагружения имеет одинаковый тренд, в противном случае тренд различен. Если порода является менее прочным компонентом, то зависимости пикового напряжения и модуля упругости от скорости нагружения не наблюдаются. Если менее прочным компонентом является уголь, то пиковое напряжение и модуль упругости сначала увеличиваются, а затем уменьшаются при наличии очевидного критического значения скорости нагружения. Зависимость пиковой деформации от скорости нагружения различается в зависимости от того, одинаковый менее прочный компонент или нет.

Скорость нагружения не оказывает существенного влияния на характер изменения механических свойств комбинированного угольно-породного образца в зависимости от относительно-го коэффициента прочности λ . При различных скоростях нагружения рост λ приводит к тому, что механические свойства образца сначала резко увеличиваются, а затем их рост замедляется и приобретает плавный характер. Однако амплитуда изменения механических свойств в значительной степени зависит от скорости нагружения, и эта зависимость различается при разных значениях λ .

Менее прочный компонент угольно-породного образца является основным разрушающимся компонентом. Чем больше значение λ , тем значительнее разрушение менее прочного компонента. При увеличении λ характер разрушения постепенно изменяется от обоюдного разрушения обоих компонентов к разрушению только менее прочного компонента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan Y. Disturbance response instability theory of rock burst in coal mine, J. China Coal Soc., 2018, Vol. 43, No. 8. — P. 2091–2098.
2. Pan Y. and Dai L. Theoretical formula of rock burst in coal mines, J. China Coal Soc., 2021, Vol. 46, No. 3. — P. 789–799.

3. **Qi Q., Pan P., Li H., Jiang D., Shu L., Zhao S., Zhang Y., Pan J., Li, H., and Pan P.** Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining, *J. China Coal Soc.*, 2020, Vol. 45, No. 5. — P. 1567–1584.
4. **Dou L., Tian X., Cao A., Gong S., He Hu., He J., Cai W., and Li X.** Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China, *J. China Coal Soc.*, 2022, Vol. 47, No. 1. — P. 152–171.
5. **Jang Y., Pan Y., Jiang F., Dou L., and Ju Y.** State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China, *J. China Coal Soc.*, 2014, Vol. 39, No. 2. — P. 205–213.
6. **Zhang Y., Zhao Y., Ding X., and Han G.** Exploration on characteristics of rock bust in deep mining area of Ordos and its prevention, *Coal Sci. Technol. Mag.*, 2022, Vol. 47, No. 1. — P. 152–171.
7. **Chen S., Li F., Yin D., and Zhang J.** Experimental study on deformation failure characteristics of limestone–coal composite with different rock-coal height ratios, *J. Cent. South Univ. (Sci. Technol.)*, 2023, Vol. 54, No. 6. — P. 2459–2472.
8. **Li H., Song L., Zhou H., Jiang D., and Wang H.** Evaluation method and application of coal burst performance under the effect of loading rate, *J. China Coal Soc.*, 2015, Vol. 40, No. 12. — P. 2763–2771.
9. **Gong F., Ye H., and Luo Y.** Rate effect on the burst tendency of coal-rock combined body under low loading rate range, *J. China Coal Soc.*, 2017, Vol. 42, No. 11. — P. 2852–2860.
10. **Chen T., Yao Q., Wei F., Chong Z., Zhou J., Wang C., and Li J.** Effects of water intrusion and loading rate on mechanical properties of and crack propagation in coal–rock combinations, *J. Cent. South Univ.*, 2017, Vol. 24, No. 2. — P. 423–431.
11. **Yin D., Chen S., Xing W., 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.
12. **Wang N., Xu Y., Zhu D., Wang N., and Yu B.** Acoustic Emission and Failure Modes for Coal-Rock Structure under Different Loading Rates, *Advances in Civil Engineering Adv Civ Eng.*, 2018, No. 8. — P. 1–11.
13. **Chen G., Teng P., Zhang G., Yang L., Li T., and Lyu P.** Fractal characteristics and energy transfer mechanism of coal-rock combined body fragments under different loading rates, *J. Chongqing Univ.*, 2022, Vol. 45, No. 8. — P. 115–129.
14. **Ma Q., Tan Y., Liu X., Zhao Z., Fan D., and Purev L.** Experimental and numerical simulation of loading rate effects on failure and strain energy characteristics of coal-rock composite samples, *J. Cent. South Univ.*, 2021, Vol. 28, No. 10. — P. 3207–3222.
15. **Liu J., Wang E., Song D., Wang S., and Niu Y.** Effect of rock strength on failure mode and mechanical behavior of composite samples, *Arab J Geosci.*, 2014, Vol. 8, No. 7. — P. 4527–4539.
16. **Liu J., Wang E., Song D., Yang S., and Niu Y.** Effects of rock strength on mechanical behavior and acoustic emission characteristics of samples composed of coal and rock, *J. China Coal Soc.*, 2014, Vol. 39, No. 4. — P. 685–691.
17. **Yang L., Gao F., and Wang X.** Mechanical response and energy partition evolution of coal-rock combinations with different strength ratios, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2020, Vol. 39, No. S2. — P. 3297–3305.
18. **He Y., Zhao P., Li S., Ho C., Zhu S., Kang X., and Barbieri D.** Mechanical Properties and Energy Dissipation Characteristics of Coal–Rock-Like Composite Materials Subjected to Different Rock–Coal Strength Ratios, *Nat. Resour. Res.*, 2021, Vol. 30, No. 3. — P. 2179–2193.
19. **Xiao X., Fan Y., Wu D., Ding X., Wang L., and Zhao B.** Energy dissipation feature and rock burst risk assessment in coal-rock combinations, *Rock Soil Mech.*, 2019, Vol. 40, No. 11. — P. 4203–4212+4219.
20. **Chen Y., Zuo J., Wei X., Song H., and Sun Y.** Energy Nonlinear Evolution Characteristics of the Failure Behavior of Coal-rock Combined Body, *Chin J. Undergr Sp and Eng.*, 2017, Vol. 13, No. 1. — P. 124–132.

21. Yang L., Gao F., Wang X., and Li J. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen, *J. China Coal Soc.*, 2019, Vol. 44, No. 12. — P. 3894–3902.
22. Zhao P., He Y., Li S., Li S., Lin H., Jia Y., and Yang E., Coal thickness effect on mechanics and energy characteristics of coal-rock combination model, *J Min Saf Eng.*, 2020, Vol. 37, No. 5. — P. 1067–1076.
23. Chen G., Li T., Zhang G., Lyu P., and Wu X. Experimental study on the law of energy accumulation before failure of coal-rock combined body, *J. China Coal Soc.*, 2021, Vol. 46, No. S1. — P. 174–186.
24. Сукнев С. В. Влияние условий водонасыщения на статические упругие свойства карбонатных пород // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 15–25.
25. Буковская М., Буковский П. Изменение свойств углепородного массива и возникновение опасных природных явлений при затоплении выработок закрытых угольных шахт // ФТПРПИ. — 2021. — № 5. — С. 56–70.
26. Chen S., Yin D., Zhang B., Ma H., and Liu X. Mechanical characteristics and progressive failure mechanism of roof-coal pillar structure, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2017, Vol. 36, No. 7. — P. 1588–1598.
27. Zuo J., Chen Y., and Song H. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2021, Vol. 52, No. 8. — P. 2510–2521.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 20/II 2024

Принята к публикации 14/III 2024