

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ И ИХ СВЯЗЬ С УДАРООПАСНОСТЬЮ

Фань Дэвэй<sup>1,2</sup>, Ван Айвэнь<sup>1,2,3</sup>, Пань Ишань<sup>1,2,3</sup>, Кун Линхай<sup>4</sup>,  
Чжао Шанькунь<sup>4</sup>, Люй Кунь<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт аварийной геомеханики, Ляонинский университет,  
E-mail: waw\_lnt@126.com, 110036, г. Шэньян, Китай

<sup>2</sup>Колледж инженерной экологии, Ляонинский университет, 110036, г. Шэньян, Китай

<sup>3</sup>Ляонинский технический университет, 123000, г. Фусинь, Китай

<sup>4</sup>Компания "Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd", Китай

Для исследования факторов, определяющих риск горного удара в подземных выработках, выполнено одноосное нагружение образцов угля при различных температурных условиях. Рассмотрены параметры высвобождения энергии нагретого угля, изменение физико-химических свойств, характер образования трещин при различных нагрузках. Рассчитаны и проанализированы изменения термомеханического состояния образцов угля и выявлены критические условия для системы "уголь – порода" при нагреве. Изучение параметров высвобождения энергии угля при увеличении температуры позволит заложить теоретические основы для комплексного контроля за динамическими событиями и для предотвращения катастроф в глубоких угольных шахтах.

*Образцы угля, термомеханическое нагружение, склонность угля к горному удару и высвобождению энергии, характер образования трещин, угольный массив*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240210

EDN: GRZTFV

В связи с истощением неглубоко залегающих запасов разработка угольных месторождений на километровой глубине в перспективе станет распространенной практикой. С увеличением глубины добычи угля высокие значения напряжений, температуры, осмотического давления и неравномерности выемки запасов постепенно приведут к повышению вероятности горных ударов в угольных шахтах [1, 2]. Температура пород постепенно повышается с увеличением глубины со средней интенсивностью 3 °C на 100 м [3]. Высокие температуры не только негативно влияют на физиологические функции человеческого организма, что снижает эффективность труда, но и значительно повышают склонность угольного массива к горному удару. Изучение влияния высоких температур на склонность массива к удару имеет существенную теоретическую и практическую актуальность для их прогнозирования и предотвращения катастроф в угольных шахтах.

В научных работах детально исследованы механические свойства образцов углесодержащей породы в различных условиях нагружения, а также акустические, оптические, электрические и другие физические сигналы, генерируемые при деформации и разрушении. В [4] для изучения механических свойств угля выполнен комплексный анализ индукции электрического заряда угольного массива в ходе деформации в различных условиях одноосного сжатия. В [5, 6] использована установка многоступенчатого нагружения с регулируемой жесткостью для экспериментального определения показателя склонности угля к горному удару при различной степени нагружения. Построена модель, описывающая энергетическое состояние пород вокруг выработок, и предложен индекс оценки жесткости для выявления угрозы горного удара.

В [7] выполнено одноосное сжатие образцов угля при разных значениях верхнего предела нагрузочного цикла и изучено влияние размера образцов на склонность угля к удару. В [8] изучен механизм разрушения и энергетического состояния угольных массивов в различных нагрузочных условиях на большой глубине. В [9] реализовано многостадийное циклическое нагружение образцов угля, склонных к удару. Исследован характер накопления и рассеивания энергии, а также механизм развития разрушения при нагружении – разгрузке. В [10] рассмотрено циклическое нагружение угольно-породных образцов для точной оценки их склонности к удару и функциональное соотношение между энергией упругой деформации и уровнем напряжений. В [11] экспериментально установлено влияние давления воздуха на механические свойства образцов угля, склонных к удару. В [12] описаны процессы разрушения и параметры акустической эмиссии разных углепородных образцов.

Результаты научных исследований важны для выявления признаков образования трещин в угольных массивах и для повышения точности систем мониторинга и раннего предупреждения горных ударов в выработках. Механические свойства угольного массива и склонность угля к удару связаны с необратимыми структурными и химическими изменениями, т. е. эндогенными факторами или химическим метаморфизмом [13 – 15].

В [16] рассмотрена склонность к удару образцов угля с различными углами расслоения и сделан вывод, что угол между поверхностью расслоения и направлением нагружения значительно влияет на склонность к удару. В [17 – 18] выполнено одноосное сжатие образцов угля, в ходе которого изучены механические свойства образцов с различным распределением трещин. В [19 – 20] проанализированы макроскопические свойства разрушения образцов угля и их склонность к удару в зависимости от параметров бурения. В [21] установлено, что прочность выбуренных образцов на одноосное сжатие и показатель склонности к удару обладают отрицательной корреляцией с диаметром бурения и количеством буровых скважин. В [22] исследовано влияние микроволновой радиации на склонность угля к удару с помощью метода микроволнового ослабления. В [23] с позиций состояний макроскопических трещин и рассеивания энергии оценивалось влияние различных температур на склонность угля к удару.

В [24] изучено изменение сигналов акустической эмиссии угля при его нагревании. В [25] приведены структурные параметры и характер образования трещин в образцах угля при различных термических нагрузках. В [26] обсуждались изменения твердости, прочности на сжатие и растяжения, динамического модуля Юнга, коэффициента теплового расши-

рения и коэффициента теплопроводности образцов угля при различных температурах. В [27] приведены сведения об изменении минерального состава и структуры пористости трех типов угля при тепловой обработке в диапазоне 600–1000 °С и установлено, что при увеличении температуры пористость угля повышается. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что склонность горному удару, механические свойства и состав угольно-породного массива изменяются при развитии эндогенных процессов, при этом поглощение и высвобождение энергии массивом в научной литературе не рассматривалось.

В настоящей работе исследуется влияние температуры на склонность угля к горным ударам, интенсивность высвобождения энергии, механические свойства и характеристики трещин в различных условиях нагружения. Изучен процесс высвобождения энергии в виде горного удара и предложены теоретические основы оптимизации метода определения склонности массива к горному удару в угольных шахтах, эксплуатирующихся в сложных геотермальных условиях.

#### **ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

*Подготовка образцов и их механические свойства.* С помощью камнерезной машины образцы получены из пластов угля с малой склонностью к горным ударам. Для снижения дисперсии результатов эксперимента все образцы откалиброваны: размеры 50×100 мм ±1–2 мм, вес 350–390 г (±5–10 г), волновая скорость составила 1200–1500 м/с.

*Термомеханическое нагружение и системы мониторинга.* Нагревательный элемент выполнен из двух стальных пластин, согнутых под прямым углом, к которым подключен датчик для регулировки и поддержания температуры в диапазоне 0–500 °С. Образцы угля оборачивались в алюминиевую фольгу для обеспечения равномерного нагрева и удержания теплоты, затем помещались на нагревательные пластины и фиксировались. Вокруг нагревательного элемента располагалась теплоизоляционная труба. Подводилось питание и устанавливалась целевая температура нагрева, которая поддерживалась на протяжении 30 мин. Измерение температуры проводилось на разных стадиях нагрева и сразу после него. Нагрузочные испытания выполнены с помощью прессы с сервоприводом в соответствии с национальным стандартом GBT 25217.2-2010. В ходе испытаний определялись четыре показателя: прочность на одноосное сжатие  $\sigma_c$ , индекс энергии удара  $K_E$ , индекс энергии упругой деформации  $W_{ET}$  и время образования динамической трещины  $D_T$ . Нагружение образцов осуществлялось при следующих температурах: 50, 100, 150, 200, 300 и 450 °С. Образцы угля классифицированы на 6 групп и образование трещин проанализировано относительно трех типовых видов разрушения [28]. Детальные условия нагружения для трех испытаний при каждой температуре представлены ниже:

- $D_T$ , мс — скорость нагружения 0.5 МПа/с;
- $W_{ET}$  — циклическое нагружение при скорости 0.5 МПа/с, повышение пикового напряжения на 5 % от прочности разрушения;
- $K_E$  — скорость нагружения 0.01 мм/мин;
- $\sigma_c$ , МПа — скорость нагружения 0.5 МПа/с.

# СКЛОННОСТЬ К УДАРУ И ВЫСВОБОЖДЕНИЕ ЭНЕРГИИ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В табл. 1 представлены результаты испытаний образцов угля при нагружении в условиях различных температур. Показатели  $\overline{\sigma_c}$ ,  $\overline{D_T}$ ,  $\overline{K_E}$ , и  $\overline{W_{ET}}$  соответствуют средним значениям прочности на одноосное сжатие, продолжительности динамического разрушения, индекса энергии удара и индекса энергии упругой деформации соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Экспериментальные данные показателей склонности образцов угля к горному удару в условиях нагружения при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_c, \text{МПа}$			$D_T, \text{мс}$			$K_E$			$W_{ET}$			Среднее ( $\overline{\sigma_c} - \overline{D_T} - \overline{K_E} - \overline{W_{ET}}$ )
20	12.19	22.19		274	271		9.07	5.16		5.26	2.74		17.19–273–7.43–4.00
50	14.46	13.95	18.46	450	550	383	7.56	8.05	3.66	6.14	9.41	4.81	15.62–461–9.64–6.79
100	14.47	15.30	17.09	1183	233	167	3.51	7.68	4.99	3.51	5.71	8.56	15.62–528–5.39–5.93
150	11.09	12.09	18.05	650	300	117	6.78	2.12	4.65	5.74	6.37	7.87	13.74–355–4.52–6.66
200	11.08	16.58	8.12	1133	900	716	4.02	5.43	4.18	6.53	3.76	6.57	11.93–916–4.54–5.62
300	12.41	13.02	10.09	933	900	934	4.14	5.23	5.64	0.71	0.99	2.20	11.84–922–5.00–1.30
450	9.56	6.19	7.24	1184	1267	766	5.35	1.82	1.96	1.85	2.45	2.26	7.66–1072–3.04–2.19
Макс.	22.19			1184			9.07			9.41			—
Мин.	6.19			117			1.82			0.71			—

На рис. 1 показана зависимость механических свойств образцов угля от температуры. Максимальные значения прочности на одноосное сжатие  $\sigma_c = 22.19$  МПа, индекса энергии удара  $K_E = 9.07$  и индекса энергии упругой деформации  $W_{ET} = 9.41$ . Эти максимальные значения установлены в температурном диапазоне 20–50 °С. Минимальные значения  $\sigma_c = 7.24$  МПа,  $K_E = 1.96$  и  $W_{ET} = 1.85$  получены при температуре 300–450°С. Минимальная продолжительность образования трещины  $D_T = 117$  мс зафиксирована при температуре 150 °С, максимальная — 1184 мс при 450°С. С ростом температуры до 150 °С разрушение происходит плавно, при повышении до 450°С наблюдается снижение хрупкости и увеличение пластичности.

*Изменение склонности угля к удару при различном термомеханическом нагружении.* Анализ результатов испытаний образцов угля позволил выявить изменение показателя склонности угля к удару в условиях нагружения при различных температурах (рис. 2). Затемненной областью на рисунке отмечен интервал допустимых отклонений значений от кривой аппроксимации. Он получен путем сочетания комплексных оценочных критериев в соответствии с национальным стандартом. Отклонение свыше допустимого интервала демонстрирует изменение индекса склонности угля к удару. В общем виде при увеличении температуры термомеханического нагружения  $\sigma_c$ ,  $K_E$  и  $W_{ET}$  показывают убывающий тренд,  $D_T$  — возрастающий.

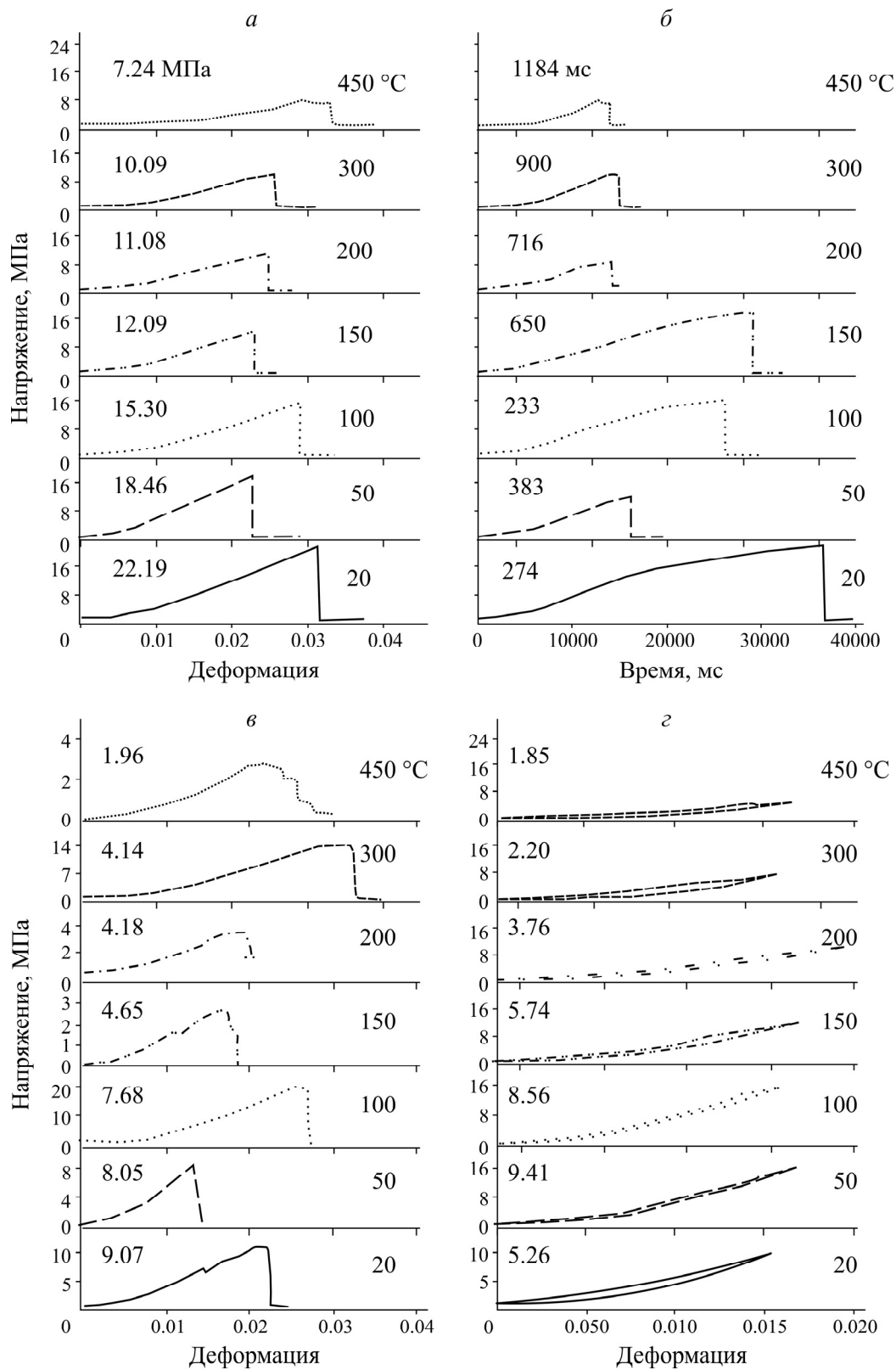


Рис. 1. Механические свойства образцов угля в условиях нагружения:  $\sigma_c$  (а);  $D_T$  (б);  $K_E$  (в);  $W_{ET}$  (г) при различных температурах

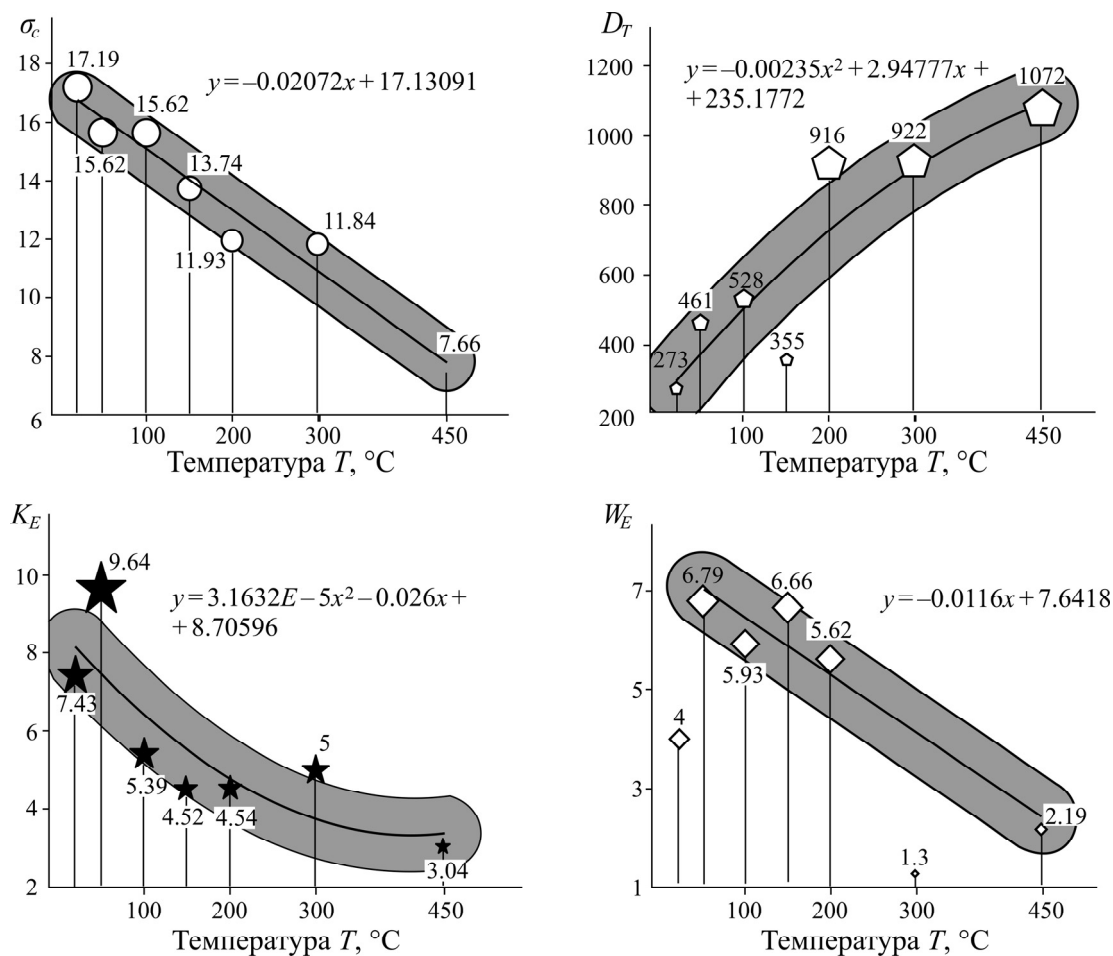


Рис. 2. Склонность образцов угля к горному удару в зависимости от температуры

На основе нечеткой комплексной оценки можно утверждать, что общий тренд изменения склонности угля к горному удару убывающий. Тем не менее рассматриваемые показатели свидетельствуют об очевидном изменении с увеличением температуры. Например,  $\sigma_c$  уменьшается с небольшими линейными колебаниями. Такой тренд обусловлен тем, что достигается своеобразный температурный порог и начитается термальное разрушение, приводящее к значительному изменению механических свойств (плотности, пористости, деформационной способности, прочности и т. д.) [29].

Зависимость  $D_T(T)$  хорошо аппроксимируется параболой: при 150 °C значение  $D_T$  достигает 355 мс, а при температуре 200 °C резко возрастает до 916 мс. Также при увеличении температуры наблюдается все большее отклонение от аппроксимирующей кривой. Эти результаты показывают, что уголь обладает экстремальными характеристиками в температурном диапазоне 150–200 °C. При увеличении температуры кривая аппроксимации  $K_E$  демонстрирует убывающий тренд в виде параболы, вогнутость которой приходится на локальный температурный диапазон 20–100 °C. При 50 °C  $K_E$  отклоняется от аппроксимирующей кривой и достигает пикового значения 9.64. В диапазоне 20–50 °C индекс  $K_E$  немного увеличивается, а при 300 °C достигается точка воспламенения угля и величина индекса  $K_E$  значительно отклоняется от значения 5. При увеличении температуры кривая аппроксимации  $W_{ET}$  линейно уменьшается. При 20 °C  $W_{ET}$  составляет 4, а в точке воспламенения (300 °C) — 1.3, в значи-

тельной мере отклоняясь от кривой. Изменение  $W_{ET}$  демонстрирует, что в диапазоне 20–50 °C увеличивается способность угля к накоплению упругой энергии. В точке воспламенения данная способность имеет минимальное значение, затем немного увеличивается до 2.19.

Представленный анализ позволяет разделить склонность угля к горному удару в зависимости от термомеханического нагружения на следующие характерные стадии: 20–50 °C — увеличение способности накапливать энергию; 150–200 °C — участок неустойчивого разрушения и 300 °C — точка воспламенения угля. При быстром и равномерном нагреве угля от 20 до 450 °C склонность угля к удару постепенно уменьшается. Однако на реальных объектах повышение температуры не происходит быстрым образом, стадия нагрева и стадия равновесия протекают в одно и то же время. Следовательно, температуру угля можно считать основной характеристикой склонности угля к горному удару.

*Изменение высвобождения энергии в условиях нагружения при различной температуре.* Механизм горных ударов в подземных выработках можно комплексно и точно оценить с помощью энергетических показателей [30]. Анализ влияния температуры на накопление, рассеивание и высвобождение энергии нагруженного угля позволяет выявить энергетические факторы возникновения горных ударов. В рамках работы рассчитаны: общая подводимая энергетическая плотность  $W$ , энергетическая плотность упругой деформации  $W_e$  и энергетическая плотность рассеивания  $W_s$  при скорости нагружения образцов 0.01 мм/мин для соответствующего индекса энергии удара  $K_E$  [31]. Также определена остаточная энергетическая плотность упругой деформации угля  $W_f$  для расчета абсолютного значения кинетической энергии, высвобожденной в результате разрушения образцов [32]. Расчеты выполнены по следующим формулам:

$$W = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon, \quad (1)$$

$$W_e = \frac{\sigma_c^2}{2E}, \quad (2)$$

$$W_s = W - W_e, \quad (3)$$

$$W_f = W_e - W_q, \quad (4)$$

где  $W_q$  площадь под кривой “напряжение–деформация” после отметки пиковой прочности. Показатели сопротивляемости деформации, такие как пиковая деформация  $\epsilon_{\max}$ , модуль деформации  $E_0$  и модуль упругости  $E$  угля при различных температурах, позволяют изучить процесс перехода деформации от хрупкой к вязкой.

В табл. 2 показаны изменения сопротивляемости деформации и энергетические показатели образцов в условиях нагружения в зависимости от температуры. Модуль пиковой деформации и модуль упругости, которые характеризуют сопротивляемость угля, при 50 °C составили 732.91 и 1123.51 МПа соответственно. Эти значения больше соответствующих при 20 °C и существенно превышают минимальные 196.04 и 303.96 МПа при 450 °C.

На рис. 3а видно, что в диапазоне 20–50 °C сопротивляемость угля деформации немного повышается, затем уменьшается при увеличении температуры до 450 °C. Энергетические величины  $W$ ,  $W_e$ ,  $W_s$ , и  $W_f$  постепенно уменьшаются с ростом температуры, достигая наименьших значений при 450 °C — 26.40, 42.67, 34.81 и 7.86 кДж/м<sup>3</sup> соответственно (рис. 3б). Изменение энергетических величин демонстрирует значительное снижение способности угля накапливать и высвобождать энергию при высоких температурах.

ТАБЛИЦА 2. Экспериментальные результаты определения сопротивляемости деформации и энергетических показателей образцов угля при различной температуре

$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\max}, \%$	$E, \text{МПа}$	$E_0, \text{МПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$W, \text{кДж/м}^3$	$W_e, \text{кДж/м}^3$	$W_s, \text{кДж/м}^3$	$W_f, \text{кДж/м}^3$
20	2.14	809.24	537.29	11.50	103.01	81.71	21.30	70.35
50	1.86	1123.51	732.91	13.66	93.69	83.04	10.65	68.18
100	3.02	633.55	270.25	8.41	87.15	55.82	31.33	45.51
150	2.65	617.38	271.36	7.20	79.08	41.98	37.10	30.28
200	2.21	544.94	332.20	7.34	66.87	49.43	17.44	38.43
300	2.92	416.12	291.80	8.52	104.42	87.22	17.20	68.98
450	2.35	303.96	196.04	4.60	42.67	34.81	7.86	26.40
Макс.	3.02	1123.51	732.91	13.66	104.42	87.22	37.10	70.35
Мин.	1.33	303.96	196.04	4.60	42.67	34.81	7.86	26.40

Характер высвобождения энергии различается в зависимости от температурного диапазона угля. При 20–50 °С  $W_f$  изменяется с 70.35 кДж/м<sup>3</sup> до 68.18 кДж/м<sup>3</sup>. В том же диапазоне  $W_e$ , т. е. способность угля накапливать энергию упругой деформации, увеличивается с 81.71 до 83.04 кДж/м<sup>3</sup>. При 20–50 °С  $W_s$  значительно уменьшается с 21.30 до 10.65 кДж/м<sup>3</sup>, что является показателем снижения способности угля рассеивать энергию.

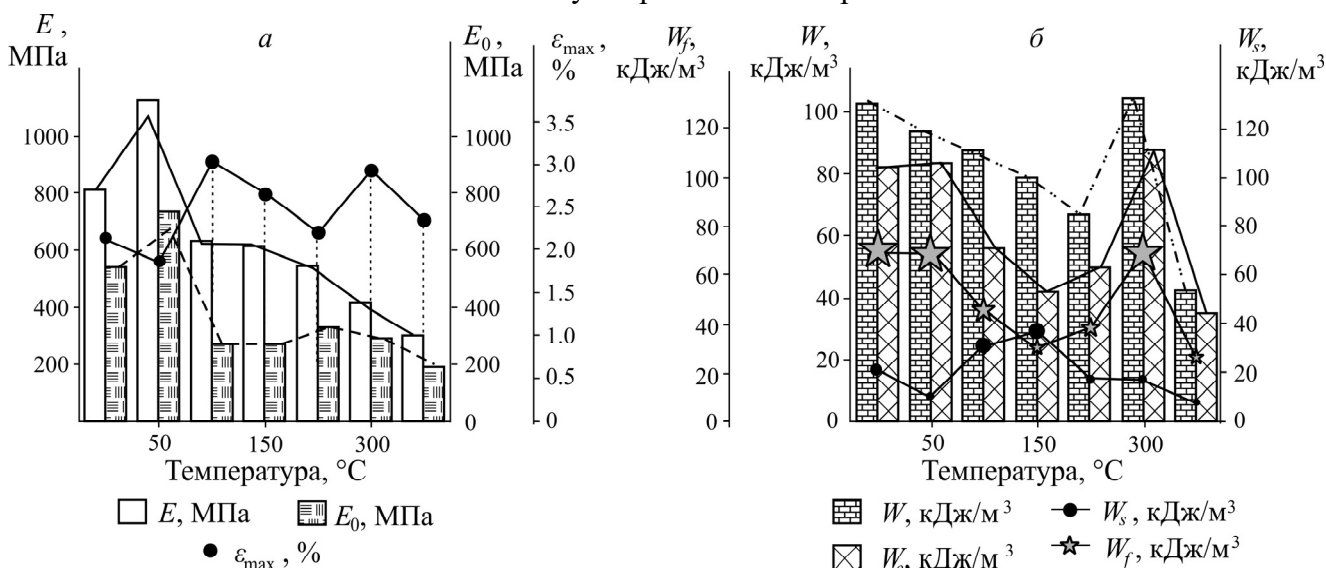


Рис. 3. Изменения показателей деформации (а) и энергии (б) образцов угля в зависимости от температуры

В температурном диапазоне 150–200 °С  $W_f$  и  $W_e$  увеличиваются с 30.28 до 38.43 кДж/м<sup>3</sup> и с 41.98 до 49.43 кДж/м<sup>3</sup>, а  $W_s$  и  $W$  уменьшаются с 37.10 до 17.44 кДж/м<sup>3</sup> и с 79.08 до 66 кДж/м<sup>3</sup> соответственно. В этом диапазоне повышается способность угля накапливать и высвобождать энергию упругой деформации, а способность рассеивать энергию пластической деформации до достижения пиковой прочности снижается. При 200–300 °С  $W_f$  увеличивается с 38.43 кДж/м<sup>3</sup> до 68.98 кДж/м<sup>3</sup>. В точке воспламенения угля 300 °С наблюдается снижение  $E$  с 544.94 до 416.12 МПа и повышение  $W_e$  с 49.43 до 87.22 кДж/м<sup>3</sup>. Предполагается, что здесь происходит значительное изменение физико-химических свойств угля, но структура угля, определяющая его прочность и пластичность, полностью не разрушается.

Аппроксимирующие уравнения для показателей деформации и энергии имеют следующий вид:

Пиковая деформация $\varepsilon_{\max}$	$y = 0.00123x + 2.15133$
Модуль упругости $E$	$y = -1.45892x + 891.94404$
Модуль деформации $E_0$	$y = -0.82349x + 517.82157$
Общая плотность подводимой энергии $W$	$y = -0.09776x + 100.1500$
Плотность энергии упругой деформации $W_e$	$y = -0.06808x + 74.3532$
Плотность рассеивания энергии $W_s$	$y = -0.02968x + 25.7968$
Остаточная плотность энергии упругой деформации $W_f$	$y = -0.06540x + 61.5985$

Энергетический подход позволяет изучить причины влияния температуры на склонность угля к горным ударам и высвобождению энергии. Сопротивляемость угля деформации и способность накапливать, рассеивать и высвобождать энергию уменьшаются при увеличении температуры. Тем не менее энергетические показатели изменяются различным образом в характерных температурных диапазонах (20–50; 150–200; 300°C) в основном из-за изменения влажности и химической структуры угля.

#### РАЗРУШЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЯ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В процессе нагрева до высоких температур уголь может выделять газ, который не предрасположен к горению из-за ограниченного контакта с воздухом и недостатка кислорода. Этот газ в основном состоит из CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, водяного пара, H<sub>2</sub>S, NO. Наблюдается также черная коллоидная жидкость, содержащая угольную смолу и углеводородную органику, что в значительной мере снижает массу образцов угля.

На рис. 4 представлен график снижения массы угля при различных температурах. Очевидно, что массовые потери увеличиваются при повышении температуры от 50 до 450 °C. Минимальная массовая потеря зафиксирована при 50 °C — 8.53 г, максимальная — при 450 °C — 26.92 г.

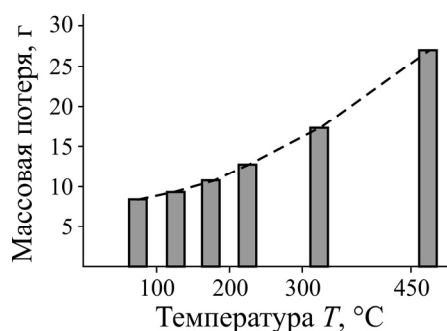


Рис. 4. Потеря массы образцов угля в зависимости от температуры

Повышение температуры приводит к значительным изменениям химического состава угля, разрушению молекулярных связей между минералами и структурным изменениям. При 20–50 °C наблюдается взаимное преобразование схожих по структуре минералов —

каолинита, накрита, диккита и галлуазита, вследствие чего немного повышается устойчивость минеральной структуры и сопротивляемость угля деформации [32]. Минеральный состав образца преобразуется следующим образом: доли галлуазита и накрита уменьшаются с 33 до 10 % и с 38 до 23 %; диккита и каолинита увеличиваются с 5 до 29 % и с 24 до 38 % соответственно. Эти процессы в основном обусловлены снижением количества молекулярно связанной воды.

В температурном диапазоне 150–200 °C отмечается частичное разрушение минеральной структуры и резкое сокращения объема внутрипоровой влаги. Это видно на примере снижения доли галлуазита и накрита с 10 до 8 % и с 23 до 20 % соответственно и увеличения доли диккита с 29 до 38 %. При 300 °C минеральная структура теряет устойчивость, влага полностью испаряется. Доли галлуазита и каолинита снижаются с 8 до 2 % и с 34 до 29 %, доля диккита увеличивается с 38 до 45 %. Следовательно, при увеличении температуры происходит трансформация минерального состава угля.

*Влияние термонагружения на деформацию угля и характер разрушения.* Высокая температура не только влияет на массовый и минеральный состав угля, но и является причиной роста внутренних и внешних микротрещин и пор. Из-за макроскопического теплового разрушения изменяются прочность и модуль упругости. Влияние высокой температуры на расширение макро- и микротрещин в угольных образцах показано на рис. 5. При 450 °C наблюдается большое количество трещин, которые пересекают друг друга. Из-за напряжений, вызванных тепловым расширением, микротрещины расширяются и постепенно соединяются, образуя макротрещины и приводя к потере прочности угля.

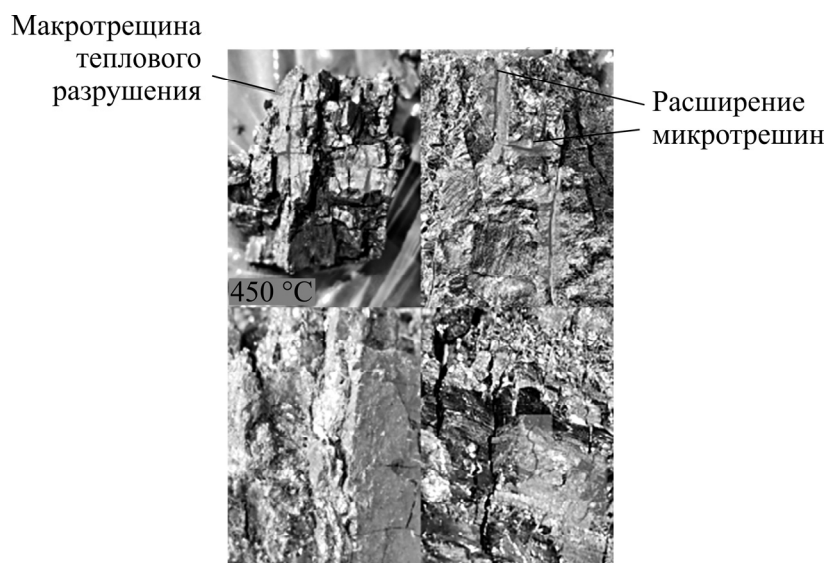


Рис. 5. Развитие микро- и макротрещин в образцах угля под действием высоких температур

В ходе испытаний определены и проанализированы характеристики разрушения угля в различных условиях нагружения (рис. 6). При скорости нагружения 0.5 МПа/с выявлены три возможных характера разрушения: вертикальное разделение, крестообразный сдвиг, разветвленный сопряженный сдвиг. В температурном диапазоне 20–200 °C наблюдается вертикальное разделение или крестообразный сдвиг, при 300–450 °C — разветвленный сопряженный сдвиг (рис. 6а).

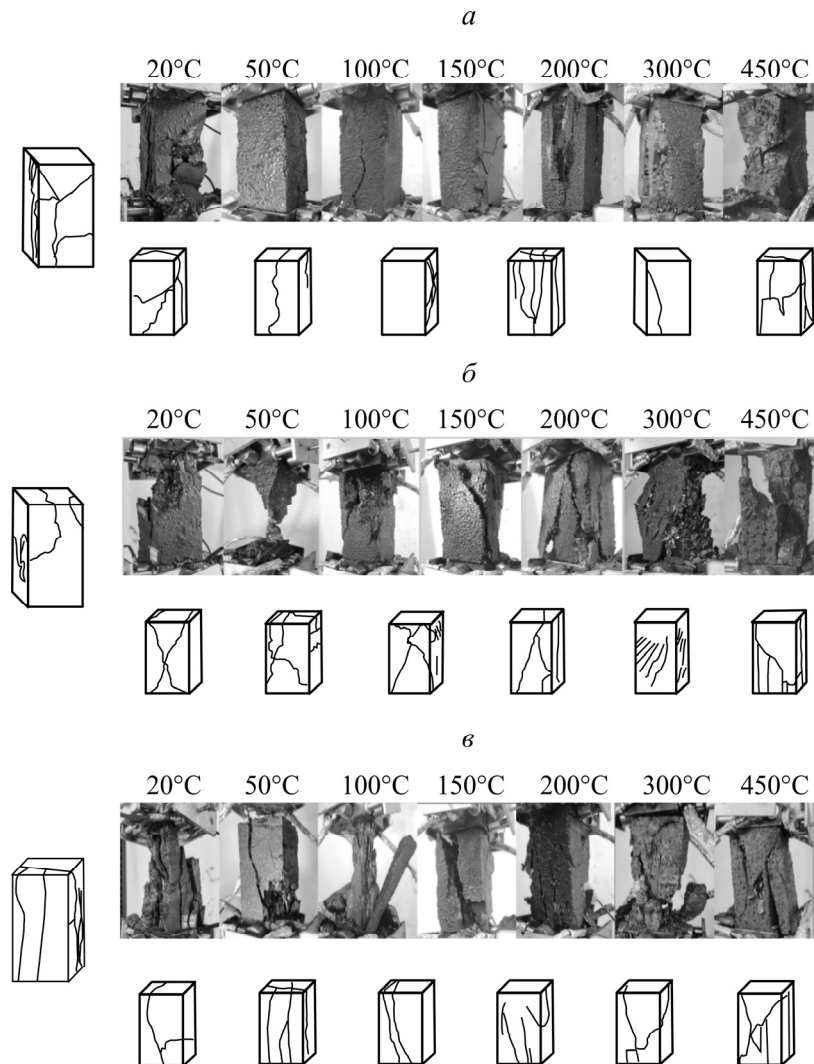


Рис. 6. Развитие разрушения образцов в зависимости от температуры при скорости нагружения 0.5 МПа/с (а); 0.01 мм/мин (б); циклическом нагружении 0.5 МПа/с (в)

Выполненный подсчет количества макротрещин, представленный на рис. 7 демонстрирует общий тренд постепенного роста количества трещин при увеличении температуры.

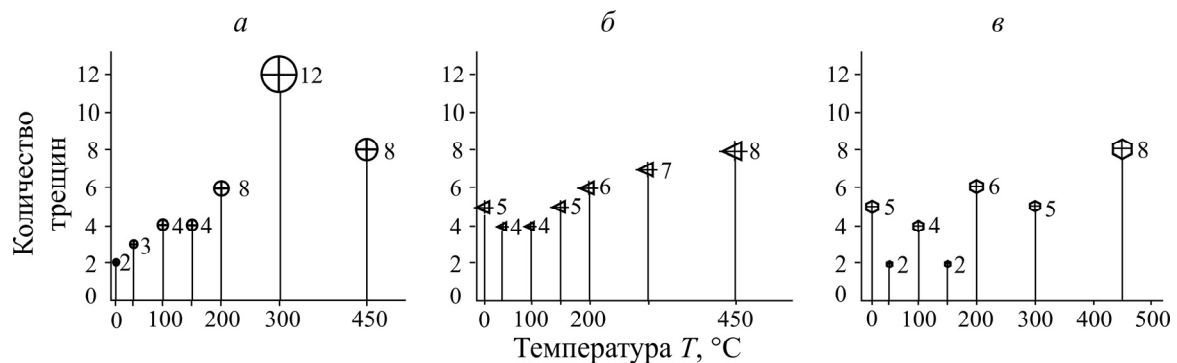


Рис. 7. Изменение количества макротрещин в зависимости от температуры и вида нагружения: а, б — скорость нагружения 0.5 МПа/с, 0.01 мм/мин; в — циклическое нагружение со скоростью 0.5 МПа/с

На рис. 6б видно, что из-за низкой скорости нагружения и высокой продолжительности деформации угля расширение трещин происходит медленно. В таких условиях разрушение в основном характеризуется вертикальным разделением. Количество трещин для нагружения 0.01 мм/мин при 20–50 °С меньше, чем при других температурах. В этом диапазоне наблюдается низкое температурное влияние на образование и расширение микротрещин, которое в основном связано со снижением влажности.

Развитие разрушения угольных образцов с повышением температуры в условиях циклического нагружения при скорости 0.5 МПа/с продемонстрировано на рис. 6в. Характер разрушения в этом случае отличается от предыдущих и включает в себя вертикальное разделение при 20–100 °С и одиночный или двойной диагональный сдвиг при 150–450 °С. Под воздействием высокой температуры уголь перестает разрушаться только растяжением и начинается разрушаться растяжением и сдвигом. В условиях циклического нагружения при скорости 0.5 МПа/с количество микротрещин колеблется в зависимости от температуры и практически совпадает их количеством при постоянном нагружении 0.5 МПа/с.

#### ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ УГОЛЬНОГО МАССИВА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для определения влияния высокой температуры на склонность к горному удару угольного массива необходимо выполнить теоретический анализ изменений критических условий [33]. Вероятность горного удара — внутреннее свойство системы деформации угольного массива, которое определяется индексом интенсивности разрушения. На данное свойство в значительной мере влияет подводимая теплота, изменяющая характер деформации выработки. Увеличение количества энергии в системе из-за повышения температуры приводит к изменению равновесного состояния угольного массива (рис. 8). После нагрева для нарушения устойчивого равновесия требуется большее количество энергии, чем перед нагревом. В условиях неустойчивого равновесия даже незначительное отклонение приведет к дестабилизации системы и высвобождению энергии.

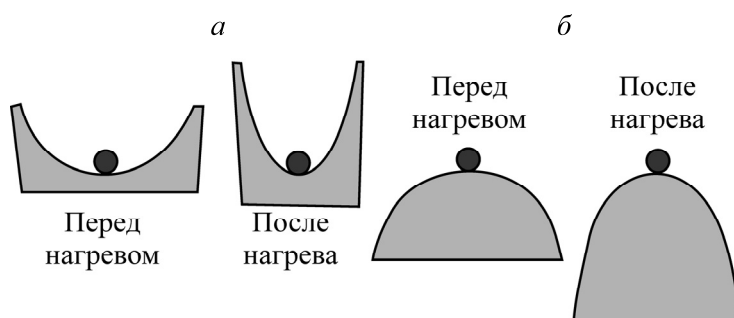


Рис. 8. Состояния устойчивого (а) и неустойчивого (б) равновесия до и после повышения температуры

Исходя из критерия неустойчивости критической точки, предложена модель горного удара для круглой выработки. Критическое напряжение и критический радиус пластической деформации горного удара определяются следующим образом:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta P} = \infty \text{ или } \frac{\Delta u}{\Delta P} = \infty ; \quad (5)$$

$$P_{cr} = \frac{\sigma_c}{2} \left( 1 + \frac{1}{K_E} \right) \left( 1 + \frac{4p_s}{\sigma_c} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\rho_{cr}}{a} = \sqrt{1 + \frac{1}{K} + \frac{1}{K} (m-1) \frac{p_s}{\sigma_c}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_c$  — прочность угля на одноосное сжатие;  $K_E$  — индекс энергии горного удара;  $a$  — радиус выработки;  $\rho$  — радиус области пластической деформации;  $p_s$  — опорное напряжение на внутренней стенке выработки;  $m = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

На основании полученных значений индекса энергии удара и прочности на одноосное сжатие при разных температурах, а также  $p_s = 0.30$  МПа,  $\varphi = 30^\circ$ , радиуса выработки 2300 мм выполнен расчет критического напряжения горного удара в угольном массиве (рис. 9). Критическое напряжение постепенно увеличивается при повышении температуры. При  $450^\circ\text{C}$  наблюдается максимальное значение 33.17 МПа, при  $20-50^\circ\text{C}$  и  $300^\circ\text{C}$  — снижение критического напряжения с 21.98 до 21.41 МПа и с 25.42 до 25.06 МПа соответственно. Это означает, что критические условия дестабилизации системы угольного массива снижаются при  $20-50^\circ\text{C}$  и в точке воспламенения  $300^\circ\text{C}$ .

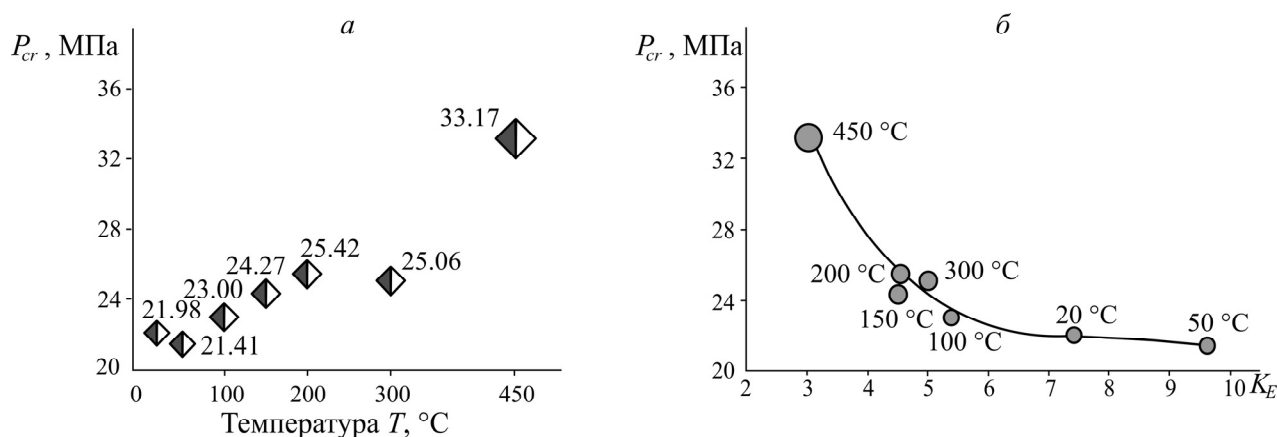


Рис. 9. Зависимость критического напряжения от температуры (а) и индекса энергии горного удара (б)

Следовательно, при увеличении количества накопленной в угольном массиве энергии возможно возникновение двух разных ситуаций. Если система находится в устойчивом равновесии, то при высокой температуре требуется большее количество энергии для нарушения равновесия, т. е. дестабилизация системы менее вероятна. Отметим, что при  $20-50^\circ\text{C}$  и  $300^\circ\text{C}$  критические условия немного снижаются. Если система находится в неустойчивом равновесии, то при высокой температуре произойдет высвобождение большего количества энергии. Тем не менее данные утверждения требуют дополнительного изучения.

## ВЫВОДЫ

При повышении температуры образцы угля показывают общий убывающий тренд склонности к горному удару. Однако в условиях нагружения при увеличении температуры наблюдается снижение сопротивляемости деформации и способности накапливать, рассеивать и высвобождать энергию.

Влияние температуры на склонность угля к горному удару и высвобождению энергии можно разделить на следующие характерные участки: 20–50 °С — увеличение способности накапливать энергию; 150–200 °С — участок неустойчивого разрушения и 300 °С — точка воспламенения.

При низких температурах (20–50 °С) наблюдается повышение сопротивляемости угля деформации. В периоде 150–200 °С фиксируется разрушение минеральной структуры угля и снижение влажности. При 300 °С испаряется вся влага и минеральная структура полностью преобразуется. При увеличении температуры угля происходит постепенное повышение критического напряжения горного удара.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и технологии КНР за финансовую помощь, а также персоналу Ляонинского университета за техническую поддержку в проведении исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xie H. P., Zhang R., Zhang Z. T., Gao M. Z., Li C. B., He Z. Q., Li C., and Liu T. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology, *J. China Coal Soc.*, 2023, Vol. 48, No. 11. — P. 3959–3978.
2. Xia K. W., Wang S., Xu Y., Chen R., and Wu B. B. Advances in experimental studies for deep rock dynamics, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2021, Vol. 40, No. 03. — P. 448–475.
3. Xie H. P., Zhou H. W., Xue D. J., Wang H. W., Zhang R., and Gao F. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth, *J. China Coal Soc.*, 2012, Vol. 37, No. 4. — P. 535–542.
4. Pan Y. S., Yang Y., Luo H., Li Z. H., and Zhu X. J. Experimental study on the mechanical charge induction law of the coal bumping proneness, *J. Saf. Environ.*, 2018, Vol. 18, No. 1. — P. 119–123.
5. Yin Y. C., Zhao T. B., Li H. T., Tang X. X., and Zhu Y. H. Bursting proneness test and evaluation index analysis of coal under different loading stiffness, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2023, Vol. 42, No. 10. — P. 1–11.
6. Zhao T. B., Yin Y. C., Tan Y. L., Xing M. L., Tang X. X., and Li C. C. Development of a rock testing system with changeable stiffness and its application in the study on the rock failure mechanical behavior, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2022, Vol. 41, No. 9. — P. 1846–1857.
7. Sun R. D., Zhang C. J., Li H. P., and Jia B. B. Study on the influence of multi-scale effect on coal bursting proneness, *Coal Sci. and Technol.*, 2022, Vol. 50, No. S2. — P. 170–179.
8. Ren J. X., Jing S. A., and Zhang K. Study on failure mechanism and acoustic emission characteristics of outburst proneness coal rock under dynamic and static loading, *Coal Sci. and Technol.*, 2021, Vol. 49, No. 3. — P. 57–63.
9. Zhang G. H., Deng Z. G., Jiang J. J., Li S. G., Mo Y. L., Wang J. D., and Ma B. W., Acoustic emission characteristics of coal with strong impact proneness under different loading modes, *J. Min. and Safety Eng.*, 2020, Vol. 37, No. 5. — P. 977–982.
10. Chen G. B., Li T., Zhang G. H., Li J. W., Liu G., He Y. L., and Li Y. Determination of bursting proneness of coal-rock combined body based on residual energy release rate index, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2023, Vol. 42, No. 6. — P. 1366–1383.

11. **Liu X. F., Wang X. R., Wang E. Y., Kong X. G., Zhang C., Liu S. J., and Zhao E. L.** Effects of gas pressure on bursting proneness of coal under uniaxial conditions, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2017, Vol. 39. — P. 90 – 100.
12. **Wang P., Jia H. J., and Zheng P. Q.** Sensitivity analysis of bursting proneness for different coal-rock combinations based on their inhomogeneous characteristics, *Geomat. Nat Hazards Risk.*, 2020, Vol. 11, No. 1. — P. 149 – 159.
13. **Gong F. Q., Zhao Y. J., Wang Y. L., and Peng K.** Research progress of coal bursting proneness indices and coal burst “human – coal – environment” three elements mechanism, *J. China Coal Soc.*, 2022, Vol. 47, No. 5. — P. 1974 – 2010.
14. **Qi Q. X., Pan Y. S., Li H. T., Jiang D. Y., Shu L. Y., Zhao S. K., Zhang Y. J., Pan J. F., Li H. Y., and Pan P. Z.** 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.
15. **Luo H., Yu J. K., Pan Y. S., Wang J. L., and Zhang Y.** Electric charge induction law of coal rock containing gas with bursting tendency during loading failure process, *J. China Coal Soc.*, 2020, Vol. 45, No. 2. — P. 684 – 694.
16. **Li L., Li H. Y., Li F. M., Qi Q. X., Sun Z. X., Mo Y. L., and Liu X.** Experimental study of the effect of bedding angle on hard coal bursting proneness, *J. Min. Saf. Eng.*, 2019, Vol. 36, No. 5. — P. 987 – 994.
17. **Zhu Z. J., Yao Z. H., Wang L. G., Han J., and Wu Y. L.** Experimental study on the influence mechanism of cracks distribution on coal-rock bursting proneness, *J. Min. Saf. Eng.*, 2023, Vol. 40, No. 3. — P. 554 – 562.
18. **Zhu Z. J., Li R. Q., Tang G. S., Han J., Wang L. G., and Wu Y. L.** Research on energy dissipation characteristics and coal burst tendency of fissured coal mass, *Coal Sci. Technol.*, 2023, Vol. 51, No. 5. — P. 32 – 44.
19. **Wang A. W., Gao Q. S., and Pan Y. S.** Experimental study of rock burst prevention mechanism of bursting proneness reduction – deformation control – energy dissipation based on drillhole in coal seam, *Rock Soil Mech.*, 2021, Vol. 42, No. 5. — P. 1230 – 1244.
20. **Wang A. W., Gao Q. S., Pan Y. S., Song Y. M., and Li L.** Bursting proneness and energy dissipation laws of prefabricated borehole coal specimens, *J. China Coal Soc.*, 2021, Vol. 46, No. 3. — P. 959 – 972.
21. **Yin Y. C., Chen B., Zhang Y. B., He S. D., Yao C. R., and Liu C. C.** Experimental study and evaluation on the weakening of bursting proneness of coal with boreholes, *Eng. Failure Anal.*, 2023, Vol. 155. — P. 107754.
22. **Hu G. Z., Wang C. B., Xu J. L., Wu X. F., and Qin W.** Experimental investigation on decreasing burst tendency of hard coal using microwave irradiation, *J. China Coal Soc.*, 2021, Vol. 46, No. 2. — P. 450 – 465.
23. **Tang M. Y.** Experimental study on the influence of high temperature on the mechanical properties of deep coal and rock, *Coal Mine Mode.*, 2023, Vol. 32, No. 5. — P. 51 – 55.
24. **Kong B., Zhong J. H., Lu W., Hu X. M., Xin L., Zhang B., Zhang X. L., and Zhuang Z. D.** Study on the change pattern of acoustic emission signal and generation mechanism during coal heating and combustion process, *Coal Sci. Technol.*, 2023. — P. 1 – 8.
25. **Wang X. Q., Ma H., Qi X. H., Gao K., and Li S. N.** Experimental research on the correlation between thermal shock coal micro-damage and energy response mechanism, *J. Saf. Environ.*, 2023, Vol. 23, No. 2. — P. 458 – 466.
26. **Honda H., Sanada Y., and Furuta T.** Mechanical and thermal properties of heat treated coals, *Carbon*, 1966, Vol. 3, No. 4. — P. 421 – 428.

27. **Jenkins R. G., Nandi S. P., and Walker P. L.** Reactivity of heat-treated coals in air at 500 °C, *Fuel*, 1973, Vol. 52, No. 4. — P. 288–293.
28. **Zhang Y. X.** *Rock Mechanics*, China Architecture and Building Press, 2004.
29. **Qi X. H., Ma H., Wang X. Q., Zhang Z. G., and Lv Y. C.** Impacts of thermal shocks on meso-damage and mechanical properties of coal, *China Saf. Sci. J.*, 2020, Vol. 30, No. 12. — P. 85–92.
30. **Lu Z. G., Ju W. J., Gao F. Q., Yi K., and Sun Z. Y.** Bursting proneness index of coal based on nonlinear storage and release characteristics of elastic energy, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2021, Vol. 40, No. 8. — P. 1559–1569.
31. **Xie H. P., Ju Y., and Li L. Y.** Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2005, Vol. 24, No. 17. — P. 3003–3010.
32. **Lu W., Zhuang Z. D., Zhang W. R., Zhang C. F., Song S. L., Wang R. Q., and Kong B.** Study on the pore and crack change characteristics of bituminous coal and anthracite after different temperature gradient baking, *Energy and Fuels*, 2021, Vol. 35, No. 23. — P. 19448–19463.
33. **Pan Y. S.** Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine, *J. China Coal Soc.*, 2018, Vol. 43, No. 8. — P. 2091–2098.

*Поступила в редакцию 06/II 2024*

*После доработки 18/II 2024*

*Принята к публикации 14/III 2024*