

**Лань Тяньвэй, Чжан Хунвэй, И.М. Батугина, Юй Лицзян,
Ли Шен, Хан Цзюнь, Сун Вэйхуа, Тан Гошуй**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СИСТЕМЫ ГОРНЫХ УДАРОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГЛУБОКОЙ РАЗРАБОТКЕ НА УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ*

Энергия, запасенная в углях и породах является динамическим источником и необходимым условием проявления горных ударов. В углепородном массиве происходят процессы обмена энергии, ее накопления и освобождения. Уровень накопления энергии должен быть связан с размерами подземного пространства определенными соотношениями. В статье рассмотрен вопрос об источнике возникновения энергии при движениях блоков земной коры, когда энергия передается от более крупных блоков к более мелким и доходит до зон ведения горных работ, включая часть угольного пласта и пород, участвующих в горном ударе. Для исследования связи между энергией горного удара и размерами участвующего в этом процессе участка массива, предложена модель «шаровая область горного удара». Установлено соотношение между энергией и радиусом «шаровой области», представлено понятие критической энергии этой области для угольных шахт.

Ключевые слова: горный удар; энергия; область горного удара; радиус области горного удара; критическая энергия.

В настоящее время в Китае остро стоит проблема горных ударов, особенно при добыче угля на больших глубинах. Механизм формирования горных ударов сложен и зависит от многих влияющих факторов [1–4]. Китай является одной из стран мира, где происходят наиболее сильные горные удары. К настоящему времени горные удары в Китае произошли на 142 угольных шахтах, которые расположены в 17 провинциях [5]. Наиболее крупный горный удар в Китае имел магнитуду 4,3, и отчетливо ощущался на земной поверхности. Очевидно, что проявление горных ударов превратилось в проблему общественной и экологической безопасности, что отмечается также и в других

странах [6]. С увеличением глубин и интенсивности разработки количество шахт, склонных к горным ударам, продолжает расти, а вызванные горными ударами последствия становятся все более серьезными.

Изучение механизма горных ударов долгое время оставалось крупной научной проблемой в области горного дела и горной геомеханики. Н. Кук считал, что горный удар происходит тогда, когда нарушено состояние равновесия системы уголь–порода и из этой системы освобождается накопленная энергия [7]. И.М. Петухов впервые выдвинул гипотезу и разработал теорию механизма горного удара, основанную на представлениях о напряженном состоянии и энергии

* Тема фонда: Открытый исследовательский фонд лаборатории изучения и профилактики теплодинамики (JSK200212) министерства просвещения КНР; Фонд Ляонинского провинциального отдела народного образования (L2013140) ; Фонд национальных естественных наук (51274117).

массива. Он разработал представление о системе «угольный пласт – вмещающие породы», энергия которых участвует в возникновении горных ударов [8, 9]. Чжан Мэнтао выдвинул теорию неустойчивости горного удара и внезапного выброса. Он считал, что горный удар и внезапный выброс угля (породы) возникает при неустойчивом неравновесном состоянии горных пород, в результате чего происходит процесс потери динамической устойчивости [10]. И.М. Батугина в своих работах развивает представления о новой науке о Земле – геодинамике недр. Эта наука синтезирует знания из смежных наук о Земле (геология, география, геотектоника, геодезия, геоморфология, геотехнология, геомеханика и др.), каждая из которых изучает одну из сторон геодинамики недр. Синтез закономерностей, полученных в смежных науках о Земле, позволил создать новый метод – метод геодинамического районирования недр, используемый для решения проблемы горных ударов [11]. Чжан

Хунвэй анализировал региональные тектонические условия, современные движения земной коры и установил, что региональные мелкие природные землетрясения связаны с горными ударами в пространстве и времени и выдвинул понятие геодинамического условия горного удара [12]. В работах А.С. Батугина отмечено, что направления смещений крыльев крупных нарушений при горных ударах подчиняются региональному полю напряжений [13]. Удароопасный участок массива, как область уголедобычи, также находится в окружающей его региональной геодинамической системе. Источник энергии горного удара нельзя ограничить только пространством штрека и забоя, участвующий в проявлении горного удара массив также должен иметь определенные размеры.

Источник энергии горных ударов

Огромная энергия, возникшая при движениях земной коры, доходит до зон ведения горных работ через среду горных пород (рис. 1). Тектонические

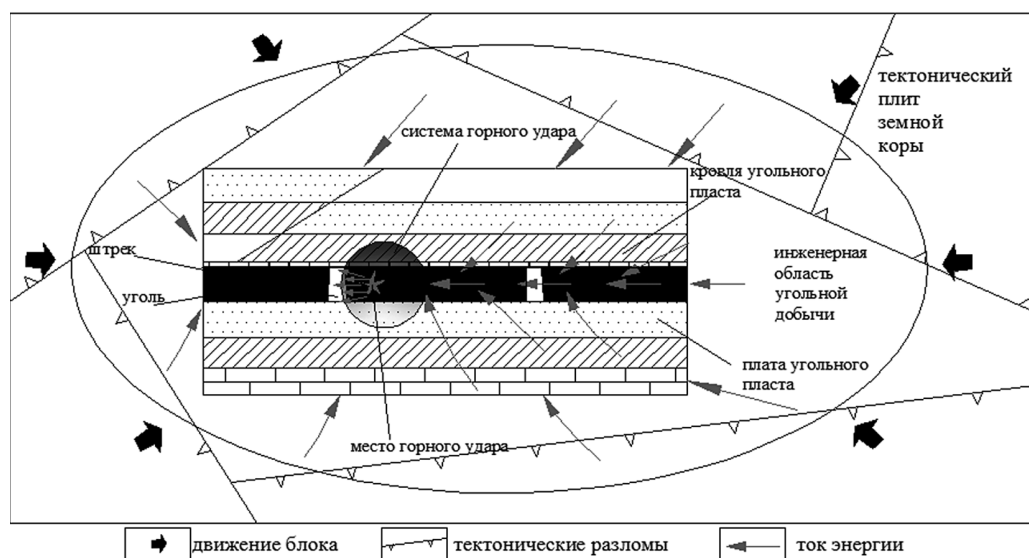


Рис. 1. Схема источника энергии горного удара

движения приводят к перераспределению напряжений и энергии в массиве пород, образованию зон повышенных и пониженных концентраций напряжений и освобождения энергии. Напряжения и энергия в массиве пород и угле концентрируются в зонах ведения горных работ, а когда напряжения и энергия достигают предельного состояния, при разработке месторождения могут происходить горные удары и другие динамические явления. Неоднородность горного массива, различие в скоростях движений и степеней сжатия блоков приводит к различию свойств, определяющих передачу и накопление энергии земной коры, к разнице магнитуд и масштабов разрушений при горных ударах. Проявление горных ударов обусловливается региональной геодинамической системой, область влияния которой зависит от ее масштаба. Поэтому геодинамическая модель проявления горных ударов должна отражать связь между энергией и масштабом влияющей системы уголь–породы.

Исследование энергии в области проявления горного удара

Область проявления горного удара включена в региональную геодинамическую систему, характеристики накопленной энергии в массивах углей и пород связаны с окружающим массивом, его структурой, напряженным состоянием, физико-механическими свойствами, температурным полем, другими характеристиками. Напряженное состояние связано с уровнем накопленной энергии и является необходимым условием для появления горного удара. Представим некоторый единичный объем, в котором, согласно представлениям геомеханики, упругие деформации массива определяются его полем напряжений (рис. 2).

Энергию упругих деформаций U_0 , Дж, можно вычислить по формуле:

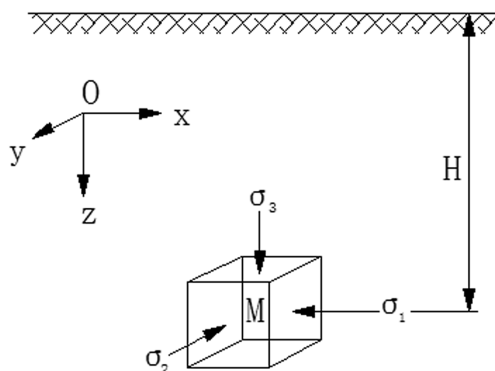


Рис. 2. Напряженное состояние единичного объема

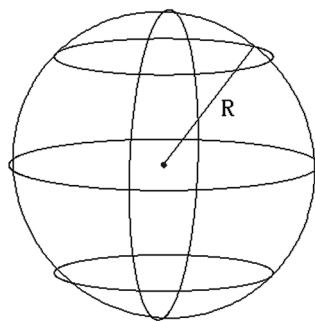


Рис. 3. Шаровая геодинамическая система проявления горного удара

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \cdot V \quad (1)$$

где σ_i – главные напряжения, МПа; E – модуль упругости, МПа; μ – коэффициент поперечной деформации; V – объем, м³.

Представим область проявления горного удара в виде шара радиусом R и назовем эту область «шаровой геодинамической системой» проявления горного удара (рис. 3). Объем этой области V определим по формуле (2).

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (2)$$

Представим накопленную в этой области энергию $\bar{U}$ как сумму энергии U_z , обусловленную полем грави-

тационных напряжений, энергии U_G , обусловленную полем тектонических напряжений и энергии U_Q , обусловленной другими факторами (энергии газа, внутреннего тепла Земли, гидравлической энергии и др.):

$$\hat{U} = U_z + U_G + U_Q \quad (3)$$

Предположим, что энергия U_Q значительно меньше U_G , и пренебрежем ею в дальнейших расчетах.

В поле гравитационных напряжений

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \lambda \sigma_3 = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \gamma H \quad (5)$$

где σ_3 – вертикальное главное напряжение, МПа; σ_1, σ_2 – горизонтальные главные напряжения, МПа; γ – средняя плотность единичного объема породного массива, н/м³; λ – коэффициент бокового отпора; H – глубина, м.

С учетом формул (1), (4), (5) получим энергию U_z , связанную с полем гравитационных напряжений:

$$U_z = \frac{2\pi}{3E} \left(\frac{1-2\mu^2-\mu}{1-\mu} \right) \gamma^2 H^2 R^3 \quad (6)$$

В поле тектонических напряжений имеем:

$$\sigma_1 = k_1 \gamma H \quad (7)$$

$$\sigma_2 = k_2 \gamma H \quad (8)$$

$$\sigma_3 = k_3 \gamma H \quad (9)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты концентрации напряжений.

Тогда накопленную энергию в области проявления горного удара радиусом R , обусловленную тектоническим полем напряжений можно определить:

$$U_G = \frac{2\pi}{3E} [k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 - 2\mu(k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3)] \gamma^2 H^2 R^3 \quad (10)$$

Имеющиеся результаты измерений напряжений на шахтах Китая и за рубежом показывают, что для

тектонического поля напряжений коэффициенты концентрации напряжений находятся в следующих диапазонах: $k_1 = 1,5 \sim 2,5$, $k_2 = 0,5 \sim 0,8$, $k_3 = 0,8 \sim 1,2$. В среднем можем принять, что $k_1 = 2$, $k_2 = 0,7$, $k_3 = 1$. Отсюда по формуле (10) получим:

$$U_G = \frac{2\pi}{3E} [5,49 - 8,2\mu] \gamma^2 H^2 R^3$$

Учитывая, что после горного удара энергия, обусловленная действием гравитационных напряжений U_z по прежнему сохраняется, а энергия, обусловленная действием тектонических напряжений U_G изменяется, можно представить энергию освобождающуюся при горном ударе как

$$\Delta U = U_G - U_z - U_Q \quad (11)$$

Тогда с учетом выражения (6) получим:

$$\Delta U = \frac{2\pi(10,2\mu^2 - 12,69\mu + 4,49)\gamma^2 H^2 R^3}{3E(1-\mu)}$$

С учетом (3) можно получить выражение для энергии, накопленной в области проявления горного удара $\hat{U}$:

$$\hat{U} = 2U_G - \Delta U \quad (12)$$

Исследование энергии проявления горного удара на угольной шахте Юэцзинь

Средняя глубина разработок в районе добычи № 25 на угольной шахте Юэцзинь в Китае достигает 850 м. С 14 декабря 2006 по 1 марта 2011 гг. в этом районе произошло четырнадцать горных ударов. В забое № 25110 произошло шесть горных ударов и в забое № 25090 произошло восемь. Магнитуды горных ударов находились в диапазоне $M_L = 0,5 \sim 3,0$. 1 марта 2011 г. произошел горный удар на глубине 875 м на вспомогательном штреке в забое № 25110, магнитуда которого составила 2,071 M_L , в результате чего штрек разрушился на участке длиной 200 м.

Известно, что механизм землетрясения и горного удара имеет много общего [14]. Для оценки энергии, высвобождаемой при горном ударе и соотношений между магнитудой и энергией, используем формулы Гутенберга-Рихтера для землетрясения (13), (14) и (15):

$$\lg \Delta U = 1,5M_S + 4,8 \quad (13)$$

$$M_S = 1,13M_L - 1,08 \quad (14)$$

$$\Delta U = 10^{1,695M_L + 3,18} \quad (15)$$

где: ΔU – сейсмическая энергия землетрясения, Дж; M_S – величина магнитуды, установленная по поверхностным волнам; M_L – прогнозируемая магнитуда землетрясения.

Для области проявления горного удара в забое № 25110 на угольной шахте Юэцзинь 01.03.2011 г. установлено, что $E = 21\,700$ МПа, $\mu = 0,24$. По формуле (15) получим:

$$\Delta U = 10^{1,695M_L + 3,18} = 10^{1,695 \times 2,071 + 3,18} = 4,9 \times 10^6 \text{ J}$$

Из формулы (11), получим радиус области проявления горного удара:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3E(1-\mu)\Delta U}{2\pi(10,2\mu^2 - 12,69\mu + 4,49)\gamma^2 h^2}},$$

$$R = 3,41 \text{ m}.$$

Поскольку газоносность угольных пластов на шахте Юэцзинь низкая, температурный и гидрогеологический режимы стабильные, можем принять, что энергия U_0 в данном случае значительно ниже U_G , и ей можно пренебречь.

Тогда по формуле (12) получим оценку накопленной энергии:

$$\bar{U} = 8,0 \times 10^6 \text{ J}.$$

Критическая энергия, необходимая для горного удара

Из-за различия горно-геологических, геодинамических и др. условий

особенности накопления и освобождения энергии при горных ударах неодинаковы. Статистический анализ выделившейся энергии при горных ударах как на китайских, так и на зарубежных шахтах показывает, что ее значения находятся в интервале 10^2 Дж– 10^{10} Дж. Обычно считается, что критическая энергия возникновения горных ударов составляет 10^4 – 10^6 Дж.

При достижении под влиянием горных работ критического уровня энергии в углепородном массиве возникают горные удары. После проявления горных ударов энергия системы уголь-порода освобождается лишь частично, часть энергии остается в системе. В то же время эта система непрерывно пополняет запас энергии за счет взаимодействия с внешней средой. Когда накопленная энергия в системе еще раз достигает критического состояния, то под влиянием разработки может произойти второй горный удар. Этот принцип пополнения энергии систем уголь-порода необходимо учитывать при разработке профилактических мероприятий.

Выводы

1. Проявление горных ударов и других динамических явлений на шахтах зависит от геодинамических условий района. Геодинамические условия можно изучать с помощью анализа механизма движений блоков, землетрясений и смещений. На стабильность системы уголь-порода и проявление горных ударов влияет уровень накопленной в этой системе энергии.

2. Разработана модель области проявления горного удара, исследована связь между энергией и масштабом этой геодинамической системы. В области проявления горного удара уровень накопленной энергии связан с величиной тектонического напряжения, поэтому в районах с высокими тектоническими напряжениями

опасность проявления горных ударов выше.

3. 1 марта 2011 г. произошел горный удар на шахте Юэцзинь, энергия которого составила $4,9 \times 10^6$ Дж, радиус «геодинамической системы»

проявления горного удара составил 3,41 м.

4. Горные удары возникают, когда энергия области горного удара достигает критического уровня, который оценивается как 10^4 – 10^6 Дж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qi Qing-xin, Dou Lin-ming. Rockburst theory and technology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007: 1–15.
2. Zhang Meng-tao, Song Wei-yuan, Pan Yi-shan. Study on water pouring into coal seam to prevent rock-burst [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(10): 69–72.
3. Dou Lin-ming, He Xue-qiu. The rockburst control theory and technology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 7–10, 12.
4. Tang Bao-qing, Cao Ping. Discussion on forecasting and prevention of rockburst [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2001, 20(1): 71–73.
5. State administration of coal mine safety. Strengthen prevention and control rockburst symposium. 2013.05.10.
6. Батугин А.С., Алферова А.С. Геодинамическая опасность как разновидность экологической опасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ8. – 2011. – С. 297–304.
7. Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rock bursts. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 66: 435–528.
8. Петухов И.М. Горные удары в угольных шахтах. – М.: Недра, 1972, 2004: Китай, 1980.
9. Петухов И.М. О природе горизонтальных сил в земной коре. – СПб.: ВНИМИ, 1991.
10. Zhang Mengtao, Xu Zenghe, Pan Yishan. A united instability theory on coal (rock) burst and outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(4): 48–53.
11. Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. – М.: Недра, 1988. – 166 с.
12. Zhang Hong-wei, Han Jun, Song Weihua, et al. Coal and gas outburst mechanism and risk analysis of tectonic concave [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 108–113.
13. Батугин А.С. Тектонофизическая модель горно-тектонических ударов с подвижками крыльев крупных тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ1. – 2010. – С. 252–264.
14. Kanamori H. The energy release in great earthquakes [J]. J Geophys Res, 1977, 82: 2981–2987. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лань Тяньвэй – доктор, преподаватель, e-mail: ltw821219@163.com, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР; Ляонинский технический университет, Лаборатория министерства образования по исследованию и профилактике термодинамических явлений, КНР; МГИ НИТУ «МИСиС», Центр геодинамики недр;
Чжан Хунвэй – доктор, профессор, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР;
Ли Шен – доктор, профессор, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР;
Хан Цзюнь – доктор, доцент, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР;
Сун Вэйхуа – доктор, доцент, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР;
Тан Гошуй – аспирант, доцент, Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела КНР;
Батугина Ирина Михайловна – доктор технических наук, научный руководитель, МГИ НИТУ «МИСиС»;
Юй Лицзян – аспирант, МГИ НИТУ «МИСиС», Центр геодинамики недр.

RESEARCH ON ROCKBURST SYSTEM ENERGY OF COAL MINE

Lan Tianwei^{1, 2, 3}, Doctor, Professor,

Zhang Hongwei¹, Doctor, Professor,

Li Sheng¹, Doctor, Professor,

Han Jun¹, Doctor, Assistant Professor,

Song Weihua¹, Doctor, Assistant Professor,

Tang Guoshui¹, Graduate Student, Assistant Professor,

Batugina I.M.³, Doctor of Technical Sciences, Supervisor,

Yu Lijiang³, Graduate Student,

¹ School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

² Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster and Prevention,
Ministry of Education of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

³ Center of Geodynamics of the Earth's interior, Mining Institute,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Stored energy in coal and rock is the the source power and the necessary condition of rockburst in coal mine. The process of energy exchange, storage and release should be carried out in certain space range, and the energy level is depend on the space range. The energy produced by plate movement will transfer gradually to the mining engineer area, the situation has been analysed in this paper, and the energy mechanism in rockburst system and rockburst basic source also be analysed in this paper. Ball body rockburst system has been established, energy characteristics of rockburst system has been analysed, the energy released from rockburst is produced by tectonic stress in system, the relationship between system energy and scale radius has been certained, and the concept of rockburst critical energy has been put forward in this paper.

Key words: rockburst, rockburst energy, rockburst system, scale radius, critical energy.

ACKNOWLEDGEMENTS

Open Research Fund of Thermodynamics Research Laboratory of the PRC Ministry of Education (JSK200212); Scientific Research Fund of Liaoning Province Educational Department (L2013140); National Natural Science Foundation (51274117).

REFERENCES

1. Qi Qing-xin, Dou Lin-ming. *Rockburst theory and technology* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007, pp. 1–15.
2. Zhang Meng-tao, Song Wei-yuan, Pan Yi-shan. Study on water pouring into coal seam to prevent rockburst [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(10), pp. 69–72.
3. Dou Lin-ming, He Xue-qiu. *The rockburst control theory and technology* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. 2001, pp. 7–10, 12.
4. Tang Bao-qing, Cao Ping. Discussion on forecasting and prevention of rockburst [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2001, 20(1), pp. 71–73.
5. *State administration of coal mine safety. Strengthen prevention and control rockburst symposium*. 2013.05.10.
6. Batugin A.S., Alferova A.S. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Special issue 8. 2011, pp. 297–304.
7. Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rock bursts. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1965, 66, pp. 435–528.
8. Petukhov I.M. *Gornye udary v ugol'nykh shakhtakh* (Rock bursts in coal mines), Moscow, Nedra, 1972, 2004: China, 1980.
9. Petukhov I.M. *O prirode gorizonta'lnykh sil v zemnoi kore* (Nature of horizontal forces in the Earth crust), Saint-Petersburg, VNIMI, 1991.
10. Zhang Mengtao, Xu Zenghe, Pan Yishan. A united instability theory on coal (rock) burst and outburst [J]. *Journal of China Coal Society*, 1991, 16(4), pp. 48–53.
11. Batugina I.M., Petukhov I.M. *Geodinamicheskoe raionirovanie mestorozhdenii pri proektirovanii i ekspluatatsii rudnikov* (Geodynamic zoning of mineral deposits in mine planning and operation), Moscow, Nedra, 1988, 166 p.
12. Zhang Hong-wei, Han Jun, Song Wei-hua, et al. Coal and gas outburst mechanism and risk analysis of tectonic concave [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(S1), pp. 108–113.
13. Batugin A.S. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Special issue 1. 2010, pp. 252–264.
14. Kanamori H. The energy release in great earthquakes [J]. *J Geophys Res*, 1977, 82, pp. 2981–2987.