



**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД
НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ “ПОРОДА – ГАЗ – ВЛАГА”**

**М. В. Курленя, В. И. Ростовцев, Р. А. Кулагин,
О. Р. Кулагин, Б. Б. Сиволап**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: benevikt@misd.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Обсуждены вопросы получения и исследования композитов, состоящих из угольных и породных твердых частиц, газов (метана, водорода) и влаги, и подходы к механизмам, инициирующим катастрофические динамические явления в процессе горных работ. На образцах различных материалов (уголь, известняк, графит) с использованием разработанного стенда установлены зависимости физико-механических свойств кернов от давления. Для длиннопламенного угля различной крупности показаны особенности изменения температуры брикетной массы при повышении давления до 200 МПа. Созданы композиты, имитирующие природный уголь и другие горные породы.

Физическое моделирование горных пород, гидравлический стенд, композиты “порода – газ – влага”, параметры композитов, температура, плотность, деформация

PHYSICAL MODELING OF ROCKS ON THE BASIS OF ROCK – GAS – MOISTURE COMPOSITES

M. V. Kurlenya, V. I. Rostovtsev, R. A. Kulagin, O. R. Kulagin, and B. B. Sivolap

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: benevikt@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 63009, Russia*

The issues of obtaining and investigating composites consisting of coal and rock solid particles, gases (methane, hydrogen) and moisture, as well as approaches to mechanisms initiating catastrophic dynamic phenomena in mining are discussed. On the samples of different materials (coal, limestone, graphite, etc.) using the developed test bench, the dependences of physico-mechanical properties of cores on pressure are established. For longflame coal of various size, the features are shown for changing the temperature of briquette mass in increasing pressure up to 200 MPa. The composites imitating natural coal and other rocks are created.

Physical modeling of rocks, hydraulic test bench, rock-gas-moisture composites, composite parameters, temperature, density, strain

Интенсивное освоение угольных месторождений за счет внедрения более производительной техники приводит к увеличению количества пожаро- и взрывоопасных ситуаций на шахтах из-за газодинамических явлений. Средства массовой информации систематически сообщают о гибели людей на угольных шахтах как в России, так и за рубежом вследствие взрывов в них горючих газов.

Так, 25 мая 1812 г. в Англии на одной из угольных шахт произошел взрыв, унесший жизни 92 человек. После этой катастрофы в городе Андерленде (Англия) было учреждено общество по предотвращению аварий, в котором плодотворно трудились известные ученые, такие как сэр Хэмфри Дэви.

Уголь представляет сложную дисперсную систему, включающую три макросоставляющие: органическую массу, влагу и минеральные компоненты. Для характеристики свойств конкретного угля важна каждая из этих составляющих [1]. Наличие в горных выработках в воздушной среде метана, водорода и других газов обуславливает необходимость детального рассмотрения роли газовой фазы [2].

Изучение закономерностей изменения свойств угля и выявление физических и структурно-химических параметров, позволяющих корректно их описывать, — одна из основных задач науки об угле. Решение этой задачи дало бы возможность научно обоснованно оценить качество угля и спрогнозировать его пригодность для заданного технологического процесса, основываясь на физических и структурно-химических показателях.

Исследования в этом направлении начаты в 50-е годы прошлого столетия [3]. Однако, несмотря на огромное количество публикаций по данному вопросу, на сегодняшний день отсутствует удовлетворительное решение. Кроме того, к сожалению, большинство этих работ посвящено частным задачам, которые ограничиваются установлением корреляционных связей типа “черного ящика” без привлечения физических моделей.

Следовательно, одним из важных факторов создания физической модели геологической среды является формирование основы, представляющей собой композит “твердое – газ – влага”. При этом уголь — твердая фаза органической массы и минеральных компонентов. Он является матрицей с наполнителями в виде влаги и газов. Газовая фаза — метан, образующийся при метаморфизме угольного вещества, который частично остается внутри угольной матрицы. Свободный метан находится в газообразном состоянии в открытых и закрытых порах. Некоторое его количество сорбируется на внутренней поверхности пор угля, а также в микропорах, размер которых сравним с размером молекул. Часть метана растворяется в твердом угольном веществе. Тем не менее, законы сорбции и растворимости [4, 5], применяемые для описания содержания газа и его выделения, не могут в полной мере объяснить все природные явления, происходящие с метаном в угольных пластах при их разработке подземным способом. Примером этого может быть [4, 6, 7–11] лавинообразное разложение метана в случае внезапных выбросов угля и газа, а также аномально низкий выход газа в пробуренные дегазационные скважины [12, 13].

В публикациях [14–17] показано, что механизма, реально объясняющего образование взрывоопасной среды, нет, а существуют несколько теорий, отмечающих участие напряженно-деформированного состояния угольного массива, а также его физико-механических и физико-химических свойств во внезапном выбросе угля и газа.

Цель статьи — поиск нового подхода к физическому моделированию горных пород на основе композита “порода – газ – влага”. Изучение качественного и количественного состава композита “уголь – газ – влага” и разработка модели угля является одним из направлений исследований ИГД СО РАН. Для создания различных моделей композита спроектирован и изготовлен специальный гидравлический стенд (рис. 1), на котором выполнялись эксперименты, позволяющие понять механизм воздействия физических параметров (влажности, фракционного и минерального составов твердой фазы, температуры, давления и др.) на формирование искусственных образцов композитов, включая их механические и структурные свойства.

Стенд состоит из силового гидроцилиндра 1 и камеры высокого давления 2, соединенных между собой шпильками 3. В камере высокого давления 2 расположен пуансон 4, приводимый в движение штоком силового гидроцилиндра. Композитная масса засыпается в рабочую полость камеры 2 и запирается съемным фланцем 5. При рабочем ходе штока силового гидроцилиндра образуется композитная матрица в виде брикета 6. Съемный фланец 5 позволяет выталкивать брикет 6.

Первым этапом работы являлось изучение температурного эффекта при создании угольной матрицы методом статического прессования. Температура измерялась на стенде, дополнительно оснащенном регулятором температуры и вакуумным насосом. Исходный материал определенной крупности, влажности и температуры загружался в камеру высокого давления 2, в которой происходило объемное сжатие материала. По мере увеличения давления сжатия регистрировались значения деформации брикетного образца и температуры в его средней части.

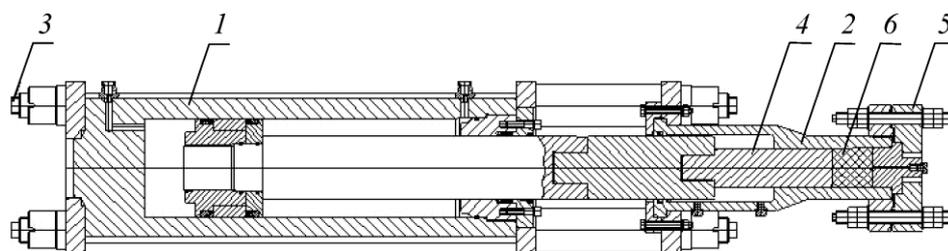


Рис. 1. Элемент гидравлического стенда для изучения композита “уголь – газ – влага”: 1 — силовой гидроцилиндр; 2 — камера высокого давления; 3 — присоединительные шпильки; 4 — пуансон; 5 — съемный фланец; 6 — композитный брикет

Фиксирование температуры выполнялось регулятором температуры РТК-02. Температурный датчик смонтирован в силовой оболочке, рассчитанной на давление 250 МПа. По каналу температурный датчик соединялся с регулятором температуры. Поддержание необходимого давления в камере 2 (низкий вакуум, атмосферное или повышенное давление) осуществлялось вакуумным насосом.

На рис. 2 приведен общий вид стенда для исследования влияния качественного и количественного состава композита на свойства модели угля. На переднем плане показан угольный брикет, полученный на стенде методом статического прессования.



Рис. 2. Стенд для исследования качественного и количественного состава композита на его свойства

На рис. 3 для длиннопламенного угля различной крупности представлены установленные зависимости изменения температуры образца от давления прессования. Его температура измерялась в условиях атмосферного давления и низкого вакуума. Экспериментально для этого угля были выявлены закономерности деформации брикетной массы.

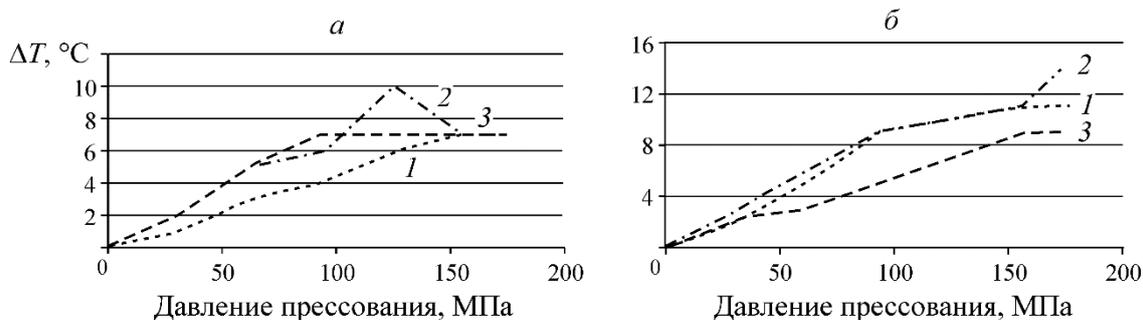


Рис. 3. Зависимости температуры образца длиннопламенного угля различной крупности (1 — ≤ 1 мм; 2 — ≤ 2 мм; 3 — ≤ 5 мм) в условиях вакуума (а) и атмосферного давления (б) от давления прессования

Зависимости для угля крупностью менее 1.0 мм показаны на рис. 4. Обобщенные результаты выполненных исследований на примере различных материалов даны в таблице. Дальнейшее использование стенда для изучения композитов “порода – газ – влага” позволит определить механизм образования взрывоопасной среды, ее детонации и динамического разрушения в зонах метастабильного состояния угольного массива и разработать его физическую модель.

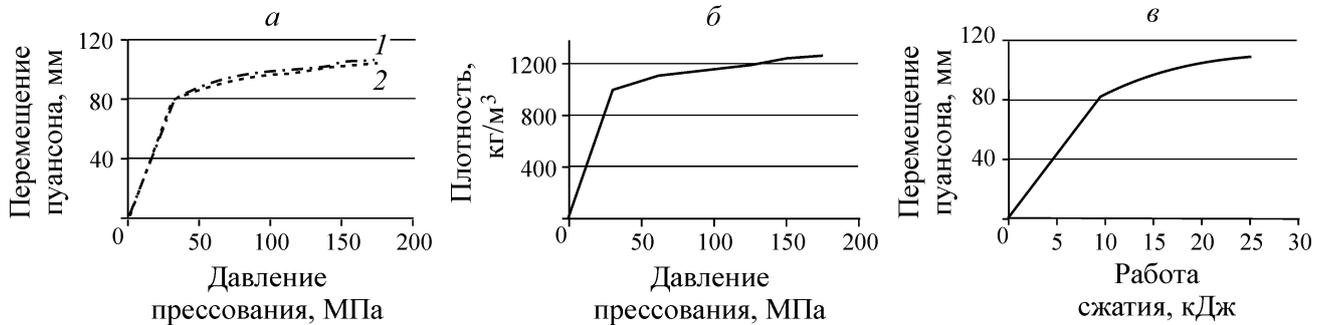


Рис. 4. Зависимости перемещения пуансона (а) (1 — в условиях низкого вакуума; 2 — в атмосферных условиях), плотности брикетной массы (б) от давления прессования и работы сжатия брикетной массы от перемещения пуансона (в) для длиннопламенного угля фракции ≤ 1.0 мм в атмосферных условиях

Обобщенные результаты исследований влияния качественного и количественного состава композита на свойства брикетов

Материал, размер фракции, мм	ΔT_{\max} , °C в условиях		Перемещение пуансона при деформации \max , мм	Плотность, кг/м ³	Работа сжатия, кДж
	атмосферы	низкого вакуума			
Уголь, ≤ 1.0	11	7	106	1260	25.05
Уголь, ≤ 2	9	7	112	1140	20.29
Уголь, ≤ 5.0	9	7	113	1140	20.29
Известняк, ≤ 1.0	6	7	106	2410	21.20
Известняк, ≤ 2.5	6	4	107	2460	21.60
Известняк, ≤ 5.0	11	4	114	2510	21.40
Графит, ≤ 1.0	6	6	139	1680	31.28
Продукт золоудаления, ≤ 1.0	11	12	137	1570	25.98
Опилки древесные	6	6	183	1730	13.34

Изменения температуры образцов длиннопламенного угля различной крупности в процессе прессования (рис. 3) показывают, что по мере повышения давления температура брикета возрастает максимум на 14 °C при атмосферном давлении и на 10 °C — в вакууме. В [18] отмечено, что температура $\Delta T \geq 3$ °C в образцах угля 40×60 мм с давлением до 5 МПа.

Результаты исследований влияния качественного и количественного состава композита на свойства брикетов, приведенные в таблице, свидетельствуют об увеличении их температуры. Максимальные значения температур (в условиях атмосферы — 11 °C, в вакууме — 12 °C) зафиксированы для брикетов на основе продукта золоудаления крупностью ≤ 1.0 мм.

Из анализа замеров величин деформации (рис. 4а) и плотности угольных брикетов видно их несущественное различие. Следует отметить, что максимальная деформация установлена для древесных опилок, а максимальная работа сжатия — 31.28 кДж — для графита крупностью ≤ 1.0 мм.

Лабораторные испытания гидравлического стенда открыли возможность создавать модели композита “уголь – газ – влага” и осуществлять физическое моделирование горных пород с учетом их вещественного состава, т. е. исследовать влияние таких физических параметров, как фракционный и минеральный состав твердой фазы, температура и давление на формирование

искусственных образцов композитов. Численные значения физических характеристик образцов композитов в виде брикетов (температура, плотность, деформация, работа сжатия) соответствуют реальным горным породам [19–23].

В [20] установлена линейная зависимость деформации угля различных марок от повышения давления. Ступенчатый характер экспериментальных зависимостей деформации и плотности угля от давления (рис. 4а, б) связан с образованием нового состояния угля. Циклическое нагружение образцов с одновременным ростом давления формирует слоистую структуру угля и обеспечивает его устойчивое физическое состояние. Поскольку работа сжатия (рис. 4в) определяется давлением и деформацией, то, как показали эксперименты, ее характер является ступенчатым. Плотность угля различных марок изменяется в диапазоне от 1150 до 1800 кг/м³ при варьировании их зольности и глубины залегания. Результаты по свойствам брикетов не противоречат данным [21] по плотности длиннопламенного угля 1200 кг/м³ и плотности известняка в диапазоне 2370–2510 кг/м³, зависящим от глубины их залегания и действующего давления.

ВЫВОДЫ

Показана возможность создания композитов “порода–газ–влага” в виде брикетов, соответствующих реальным горным породам, на основе угля, известняка, графита, древесных опилок, золы, что позволяет осуществлять физическое моделирование с учетом вещественного, фракционного и минерального составов, температуры и давления с помощью специального стенда. Для разных пород получены зависимости изменения температуры, деформации и плотности брикетной массы от давления прессования, а также работы сжатия от деформации образцов. На примере длиннопламенного угля различной крупности оценены изменения температуры, деформации и плотности брикетной массы при повышении давления до 200 МПа. В этом случае температура угольного образца возрастает максимум на 14 °С в атмосферных условиях и на 10 °С в вакууме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Gyulmaliev A. M., Golovin G. S., and Gladun T. G.** Theoretical fundamentals of the chemistry of coal, Moscow, Izd. MGGU, 2003, 556 pp. [Гюльмалиев А. М., Головин Г. С., Гладун Т. Г. Теоретические основы химии угля. — М.: Изд-во МГГУ, 2003. — 556 с.]
2. **Kozlovsky E. A., Sharov G. N., Kantorovich A. E., Gritsko G. I., Kuznetsov F. A., Kurlenya M. V., Kovalev V. A., Rostovtsev V. I., Belozеров I. M., Chernook V. A., Minin V. A., and Vashlaeva N. Yu.** Gas explosion hazard in underground coal mining in Kuzbass, Fundamental and Applied Mining Science, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 76–82. [Козловский Е. А., Шаров Г. Н., Канторович А. Э., Грицко Г. И., Кузнецов Ф. А., Курленя М. В., Ковалев В. А., Ростовцев В. И., Белозеров И. М., Черноок В. А., Минин В. А., Вашлаева Н. Ю. Взрывоопасность газа при подземной добыче угля в Кузбассе // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 76–82.]
3. **Van-Krevelen D. V. and Schuyer J.** Coal science, Amsterdam, Elsevier publishing company, 1957, 302 pp. [Ван-Кревелен Д. В., Шуер Ж. Наука об угле. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во по горному делу, 1960. — 302 с.]
4. **Hayruni A. T.** The Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines, Moscow, Nauka, 1987, 310 pp. [Айруни А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. — М.: Наука, 1987. — 310 с.]
5. **Ettinger I. L.** Gas intensity of fossil coals, Moscow, Nedra, 1966, 224 pp. [Эттингер И. Л. Газоёмкость ископаемых углей. — М.: Недра, 1966. — 224 с.]
6. **Fundamentals of the theory of sudden coal, rock and gas outbursts**, Moscow, Nedra, 1978, 164 pp. [Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. — М.: Недра, 1978. — 164 с.]
7. **Kolesnichenko E. A., Artemiev V. B., and Kolesnichenko I. E.** Sudden methane emissions: theoretical basis, Moscow, Gornoe delo, 2013, 232 pp. [Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Колесниченко И. Е. Внезапные выбросы метана: Теоретические основы. — М.: Горное дело, 2013. — 232 с.]
8. **Khodot V. V.** Sudden outbursts of coal and gas, Moscow, GNTI, 1961, 363 pp. [Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. — М.: ГНТИ, 1961. — 363 с.]

9. **Khristianovich S. A.** On the emission wave, *Izv. AN SSSR. ONT*, 1953, no. 12, pp. 1679–1688. [Христианович С. А. О волне выброса // Изв. АН СССР. ОНТ. — 1953. — № 12. — С. 1679–1688.]
10. **Chernov O. I. and Rosancev E. S.** Prevention of sudden coal and gas outbursts in coal mines, Moscow, Nedra, 1965, 212 pp. [Чернов О. И., Розанцев Е. С. Предупреждение внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах. — М.: Недра, 1965. — 212 с.]
11. **Lama R. and Saghafi A.** Overview of gas outburst and unusual emissions, *Coal 2002, Coal Operators' Conference, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 2002, pp. 74–88.
12. **Malyshev Yu. N., Trubetskoy K. N., and Hayruni A. T.** Fundamental and applied methods of solving the problem of coal bed methane, Moscow, Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 2000, 519 pp. [Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. — 519 с.]
13. **Problems of the theory of plasticity and geomechanics: to the 100th anniversary of Academician S. A. Khristianovich, V. I. Karev (Ed.)**, Moscow, Nauka, 2008, 391 pp. [Проблемы теории пластичности и геомеханики: к 100-летию со дня рождения акад. С. А. Христиановича / под ред. В. И. Карева. — М.: Наука, 2008. — 391 с.]
14. **Vychkov S. V.** Chemical reactions during earthquakes. Explosion of rock mass as the source of shocks, sudden outbursts and mountain shocks, *Vestnik of safety in coal mining scientific center*, 2016, no. 4, pp. 36–47. [Бычков С. В. Химические реакции в процессе землетрясений. Взрыв пород горного массива как источник толчков, внезапных выбросов и горных ударов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 4. — С. 36–47.]
15. **Petrosyan A. E., Ivanov B. M., and Krupenya V. G.** Theory of sudden outbursts, Moscow, Nauka, 1983, 152 pp. [Петросян А. Э., Иванов Б. М., Крупеня В. Г. Теория внезапных выбросов. — М.: Наука, 1983. — 152 с.]
16. **Hargraves A. J.** Gas and gas-dynamic phenomena in coal and evaporates. *Coalbed Methane Symposium*, November 1992.
17. **Kolesnichenko E. A. and Kolesnichenko I. E.** Formation of physical and chemical structure of coal substance with abnormal properties in the centers of sudden coal and gas emissions, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2000, no. 5, pp. 199–200. [Колесниченко Е. А., Колесниченко И. Е. Формирование физико-химической структуры угольного вещества с аномальными свойствами в очагах внезапных выбросов угля и газа // ГИАБ. — 2000. — № 5. — С. 199–200.]
18. **Some problems of gas-dynamic phenomena in coal mass in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics / A. F. Bulat, V. I. Dyrda**, Kiev, *Geotechnical mechanics*, 2013, 108 pp. [Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А. Ф. Булат, В. И. Дырда. — Киев: Геотехнічна механіка, 2013. — 108 с.]
19. **Physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters: Handbook**, M. P. Volarovich (Ed.), Moscow, Nedra, 1988, 255 pp. [Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: справочник / под ред. М. П. Воларовича. — М.: Недра, 1988. — 255 с.]
20. **Shubin V. P.** To the question of research of physical and mechanical properties of some rocks of coal mines of Kuzbass, *Izv TPI*, 1951, vol. 68, issue 1, pp. 130–170. [Шубин В. П. К вопросу об исследованиях физико-механических свойств некоторых пород каменного угля шахт Кузбасса // Изв. ТПИ. — 1951. — Т. 68. — Вып. 1. — С. 130–170.]
21. **Physical properties of rocks and minerals (petrophysics), Handbook of Geophysics**, N. B. Dortman (Ed.), Moscow, Nedra, 1984, 455 pp. [Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. — М.: Недра, 1984. — 455 с.]
22. **Pinitskaya E. I., Teder R. I., Vatolin E. S., and Kuntysh M. F.** Rock Properties and Methods of their Determination, M. M. Protodyakonov (Ed.), Moscow, Nedra, 1969, 392 pp. [Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения / под ред. М. М. Протодьяконова— М.: Недра, 1969. — 392 с.]
23. **Danilovich A.** Pressure and its effect on the substance, Available at: www.electrosad.ru/Proekt/Earth.htm [Данилович А. Давление и его влияние на вещество.] www.electrosad.ru/Proekt/Earth.htm.