ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(7):185-195

УДК 550.3 + 551 + 622 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-185-195

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБРОСООПАСНОСТЬ УГЛЕЙ КУЗБАССА

Т.А. Киряева

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: coalmetan@mail.ru

Аннотация: Рассмотрено влияние совокупности основных факторов, при наличии которых создаются реальные условия для возникновения выбросов угля и газа в угольных шахтах. В частности, изменения выхода летучих веществ, влажности, пористости, глубины отрабатываемых горизонтов угольных месторождений Кузбасса. В физико-химическом аспекте рассмотрена важнейшая роль ад- и абсорбционных процессов в угольном веществе различной стадии метаморфизма. Установлена бифуркация параметров метаноемкости, влажности и пористости для каменных углей Кузбасса и для более широкого диапазона марочного состава углей: от суперантрацитов до бурых Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. Экспериментально-теоретически изученные особенности поведения эмпирических зависимостей согласуются с выбросоопасностью основных стратиграфических структур Кузбасса. Наибольшая газодинамическая активность угольных пластов наблюдается при смене градиентов в точке бифуркации, в которой установлено снижение выбросоопасной глубины подземных горных работ. Показано, что в точке бифуркации параметров метаноемкости углеметановый пласт генетически способен сформировать возмущающий газодинамический импульс, достаточный для развития его саморазрушения. Эти качества объясняют внезапность выбросов угля и газа.

Ключевые слова: бифуркация, выбросоопасность, уголь, сорбция, метаноносность, влажность, пористость, выход летучих веществ, уравнение Ленгмюра.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282).

Для цитирования: *Киряева Т. А.* Основные факторы, влияющие на выбросоопасность углей Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 185–195. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-185-195.

Key factors to govern outburst hazard in Kuzbass coal

T.A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia, e-mail: coalmetan@mail.ru

Abstract: The article discusses how a family of governing factors actualizes conditions for coal and gas outbursts in mines. Such factors include, in particular, volatile yield, moisture content, porosity and depth of coal mining in Kuzbass. In terms of physicochemistry, the critical role of adsorption and absorption processes in coal substance of different rank is discussed. Existence of bifurcation in methane content, moisture content and porosity is found for Kuzbass coal and wider range coal grades: from super anthracite to lignite from the Donets and Lvov–Volyn basins. The experimentally and theoretically examined behavior of empirical relations agrees with actual outburst hazard of basic stratigraphic structures in Kuzbass. The highest gas-dynamic activity is observed in coal seams at the changeover of gradients at the bifurcation point of the outburst-hazardous mining depth.

© Т.А. Киряева. 2019.

It is shown that at the bifurcation point of methane content, coal seam has genetic ability to generate a disturbing gas-dynamic impulse sufficient for coal self-destruction to be initiated. These qualities explain suddenness of coal and gas outbursts.

Key words: bifurcation, outburst hazard, coal, sorption, methane content, moisture content, porosity, volatile yield, Langmuir equation.

Acknowledgements: The work was supported by Russian Science Foundation, Project No. 17-17-01282.

For citation: Kiryaeva T.A. Key factors to govern outburst hazard in Kuzbass coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):185-195. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-185-195.

Введение

Одной из наиболее важных задач обеспечения безопасности при разработке угольных месторождений является прогнозирование газодинамической активности углеметановых пластов. Все угольные месторождения планеты содержат газ, и их разработка сопровождается разного вида газопроявлениями — от квазистатических до динамических.

Месторождения Кузбасса в этом плане уникальны. В отличие от подавляющего большинства известных месторождений зоны метановых газов в Кузбассе начинаются с глубин, меньших в два-три раза. Газоносность в $5 \cdot 10^{-3}$ м^3/кг регистрируется уже на глубине менее 100 м. Быстро нарастая, она к 500—700 м достигает $(30 \div 35) \cdot 10^{-3}$ м^3/кг. На этих глубинах содержащийся в угольных пластах метан способен создавать давление до $(4 \div 6) \cdot 10^6$ Па. Максимальное замеренное давление — $12 \cdot 10^6$ Па (Донбасс, 1200 м). С учетом того, что в последние десятилетия в России качественно изменилась инструментально-вычислительная база мониторинга свойств и состояний массива газоносных горных пород, появилась возможность изучать взаимосвязь геомеханического поведения миллионов кубических метров горных пород с их физико-химическими свойствами [1, 2].

Повысить надежность и научную обоснованность безопасной добычи угля возможно на основе изучения взаимосвязи геомеханических и физико-химических процессов и с учетом установленных при этом закономерностей. При наличии в пласте выбросоопасной зоны разрушение горными работами участка из малопроницаемого угля способно привести к «скачкообразному» смещению вмещающих пород с последующим резким изменением энергетического состояния системы «уголь-метан» сорбированного метана. Избыток упругой энергии переходит при этом в кинетическую энергию структурных отдельностей системы «метан-уголь», производя работу по измельчению и выносу угля [3]. Как отмечено в [4], выбросоопасность угольных пластов является следствием единого геомеханико-термодинамического и физико-химического процесса, происходящего в угольных пластах при их отработке.

Для количественной проверки этой гипотезы был осуществлен сбор, систематизация и оформление баз данных по Кузнецкому угольному бассейну по 15 600 пластопересечениям 11 месторождений Кузбасса, относящихся к стратиграфическому распределению ресурсов угля и метана, метаноносности углей, а также внезапных выбросов угля и газа в шахтах Кузбасса за длительный период их функционирования (1947—2010 гг.). Информационной базой для наших исследований метаноемкости послужили данные по 1476 пробам углей разрабатываемых месторождений Кузбасса, Донбасса и Львовско-Волынского бассейнов. Диапазоны изменения приводимых здесь значений достаточно полно

охватывают различные свойства каменных углей этих угольных бассейнов:

$0{,}7\% \le W \le 9\%$; $1{,}3\% \le П \le 30\%$;

$7\% \le V^{daf} \le 45\%$; 30 м $\le H \le 1050$ м,

где W — аналитическая влажность, %; $П$ — пористость, %; V^{daf} — выход летучих, %; H — глубина залегания пласта в точке отбора пробы, м. Метаноемкость измерялась в диапазоне установившихся давлений метана $(0{,}1 \div 4) \cdot 10^6$ Па. На сформированные базы данных получено в 2018 г. четыре авторских свидетельства РФ на БД [16—19].

Поэтому ставится задача изучить влияние совокупности основных факторов, при наличии которых создаются реальные условия для возникновения выбросов угля и газа.

Бифуркация физико-химических свойств углей, влияющих на их выбросоопасность

В физико-химическом аспекте важнейшую роль играют ад- и абсорбционные процессы в угольном веществе различной стадии метаморфизма. Несмотря на высокое давление, метан очень медленно выделяется из не разгруженных от горного давления угольных пластов. Его нельзя оценивать как свободный газ, так как он миллионы лет сохранял свое состояние в составе углеметанового вещества, находясь достаточно близко к земной поверхности при вполне значимой для этого периода времени проницаемости. Метаноемкость — количество газа, которое может быть поглощено (адсорбировано, абсорбировано, растворено, находится в виде газовой фазы в крупных по сравнению с молекулами метана пустотах угля) единицей объема или массы полезного ископаемого принято рассчитывать по уравнению Ленгмюра. Метаноемкость тесно связана с физико-химическими свойствами углей и физической структурой угольного вещества: выходом летучих веществ, пористостью, влажностью и т.д. [5]:

$$X_s = abP/(1 + bP),\ м^3/кг, \qquad (1)$$

где a — предельная метаноемкость, $м^3/кг$; b — коэффициент сорбции, 1/Па; P — давление газа, Па.

При обработке с использованием каталогов 1—4 по предложенной автором методике экспериментальных данных получены выражения для расчета коэффициентов a и b метаноемкости X_s на основе уравнения Ленгмюра (1):

- предельная метаноемкость —

$$a = -0{,}0012(V^{da})^3 + 0{,}091(V^{daf})^2 - 2{,}25(V^{daf}) + 35{,}7,\ 10^{-3}\ м^3/кг; \qquad (2)$$

- коэффициент метаноемкости —

$$b = 3{,}9(V^{daf})^{-0{,}3},\ 10^{-6}\ 1/Па, \qquad (3)$$

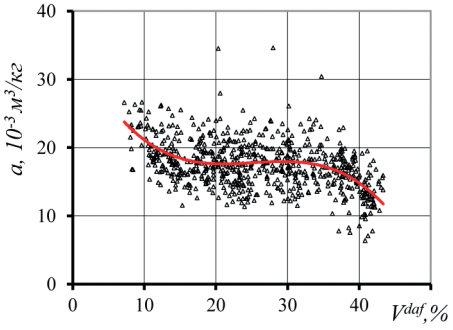

Рис. 1. Зависимости предельной метаноемкости a от выхода летучих веществ углей Кузбасса
Fig. 1. Limiting methane content versus volatile yield in Kuzbass coal

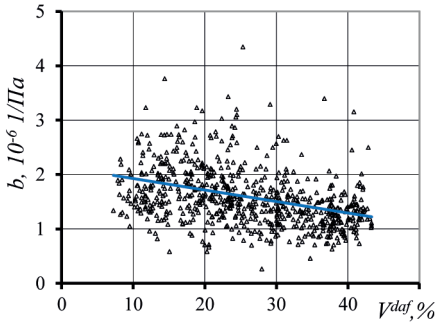

Рис. 2. Зависимости коэффициента сорбции b от выхода летучих веществ углей Кузбасса
Fig. 2. Sorption coefficient b versus volatile yield in Kuzbass coal

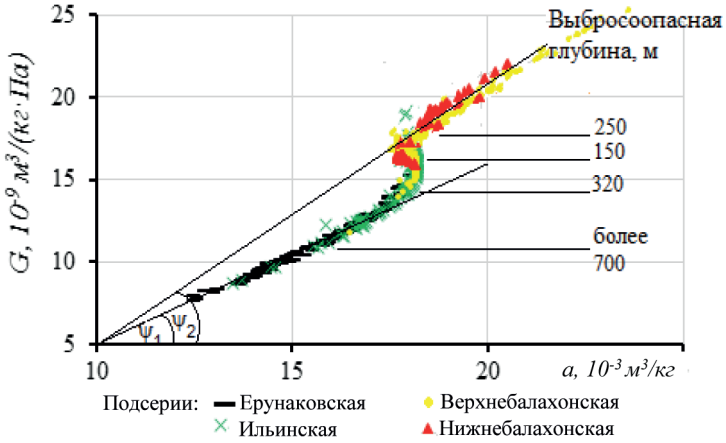

Рис. 3. Изменения первой производной уравнения Ленгмюра G от предельной метаноемкости a углей Кузбасса

Fig. 3. Variation in first-order derivative of Langmuir equation, G, as function of limiting methane content in Kuzbass coal

где V^{daf} — среднее значение выхода летучих веществ на глубине 100 м для свит Кузнецкого угольного бассейна.

Сравнительный трендовый анализ приведенных на рис. 1, 2 статистических зависимостей между коэффициентами предельной метаноемкости *a* (рис. 1), сорбции *b* (рис. 2) и выходом летучих веществ V^{daf}, соответственно, свидетельствует о следующем.

Имеет место ярко выраженная нелинейная, близкая к монотонной, связь между коэффициентами a и V^{daf} (1), с повышенными по модулю отрицательными градиентными изменениями *a* по V^{daf} для примерных диапазонов $V^{daf} \leq 18\%$ и $V^{daf} \geq 38\%$, а также наличием плато при $18\% < V^{daf} < 38\%$.

Имеет место близкая к линейной связь между коэффициентами *b* по V^{daf} с отрицательным градиентом (2).

Совместная статистическая обработка экспериментальных данных по Кольчугинской и Балахонской сериям приводит к повышенной дисперсии для корреляционных зависимостей между коэффициентами V^{daf}, *a* и *b* соответственно.

В работах [6, 7] показано, что средняя стадия метаморфизма углей является наиболее выбросоопасной. Коэффициенты сорбции *a* и *b* являются функциями от выхода летучих веществ (2), (3). Возникло предположение, что эти эмпирические зависимости (2), (3) должны также согласовываться с «выбросоопасностью» основных стратиграфических структур угольных бассейнов России. Для этого было изучено изменение первой производной уравнения Ленгмюра *G* от предельной метаноемкости *a* для каменных углей Кузбасса и углей Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов (от бурых до суперантрацитов) с учетом минимальных значений выбросоопасных глубин, полученных на основании опыта разработки 15 месторождений Кузбасса (рис. 3, 4)

$$G = dX_s / dP = ab / (1 + bP)^2 \qquad (4)$$

Из (4) теоретически следует, что при $P = 0$, точки перегиба на рис. 3, 4 быть не должно. Но, как показали данные каталогов для Кузбасса (рис. 3), при значениях $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг существует перегиб графика, которому соответствуют угольные пласты, имеющие наибольшую газодинамическую активность [8]. Для них установлена выбросоопасная глуби-

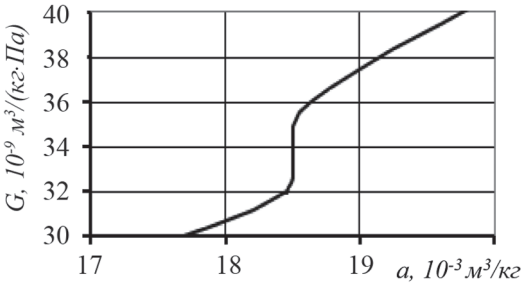

Рис. 4. Изменения первой производной уравнения Ленгмюра G от предельной метаноемкости a углей Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов

Fig. 4. Variation in first-order derivative of Langmuir equation, G, as function of limiting methane content of coal from the Donets and Lvov–Volyn basins

на подземных горных работ 150 м. Для углей Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов (рис. 4), перегиб графика соответствует $a = 18{,}5 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Более детальное исследование этого эффекта показало следующее. Зависимость предельной метаноемкости *a* от пористости *П* для подсерий углей Кузбасса представлена на рис. 5, из которого видно, что весь график можно разбить на 3 ветви. При этом явно выделяются значения $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, соответствующие точке бифуркации. Проанализируем соответствующие этим участкам значения пористости.

Изучение пористости [9—12] важно для уточнения знаний о коллекторских свойствах углей, в частности, ее влияния на метаноемкость углей. В этой связи осуществлялся поиск возможных закономерностей изменения пористости от выхода летучих веществ для углей Кузбасса на основе каталогов.

Для такого анализа были установлены зависимости пористости от выхода летучих веществ угольных пластов (стадий метаморфизма) для разных значений предельной метаноемкости *a*:

- $a < 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг;
- $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг;
- $a > 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.

Полученные результаты показаны на рис. 6—9.

При уменьшении пористости до 5,5÷6% в точке бифуркации при $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг (рис. 5) меняются свойства углей в части выбросоопасности. При $a < 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг пористость углей уменьшается с ростом

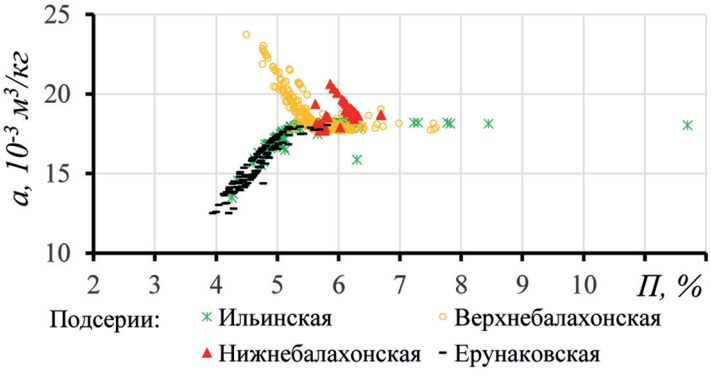

Рис. 5. Изменения предельной сорбционной метаноемкости a в зависимости от пористости П для подсерий углей Кузбасса

Fig. 5. Limiting methane adsorption capacity versus porosity P for some coal grades in Kuzbass

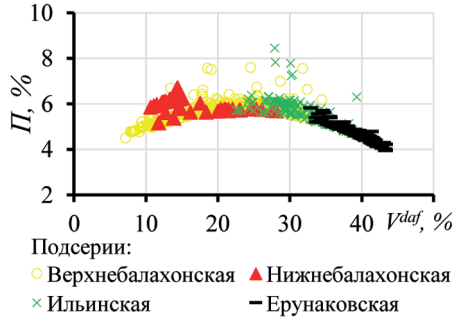

Рис. 6. Зависимость между пористостью П и выходом летучих веществ V^{daf} для подсерий углей Кузбасса

Fig. 6. Curve of porosity P and volatile yield V^{daf} for some coal grades in Kuzbass

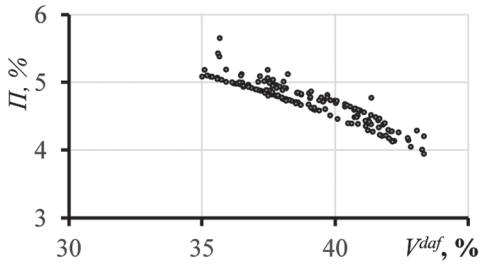

Рис. 7. Зависимость между пористостью П и выходом летучих веществ V^{daf} для значений предельной сорбционной метаноемкости $a < 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг

Fig. 7. Curve of porosity P and volatile yield V^{daf} at limiting methane adsorption capacity $a < 18 \cdot 10^{-3}$ m³/kg

выхода летучих веществ (рис. 7). На этом интервале стадии метаморфизма находятся невыбросоопасные, молодые по геологическому возрасту (260 млн лет) бурые угли с V^{daf} = 35÷45%. В точке бифуркации при $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг пористость углей практически не изменяется при увеличении выхода летучих веществ и соответствует средней, самой выбросоопасной стадии метаморфизма углей (рис. 8). Это ясно видно на примере нижнебалахонской подсерии, наиболее старой по геологическому возрасту (307 млн лет) и опасной по внезапным выбросам угля и газа. При $a > 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, уменьшение пористости прямо пропорционально (рис. 9) изменению выхода летучих веществ (геологический возраст углей 275 млн лет). Таким образом, наиболее выбросоопасными являются каменные угли с пористостью около 6%, имеющие предельную метаноемкость $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг (точка бифуркации).

Аналогичные исследования были проведены для влажности угольных пластов Кузбасса (рис. 10, 11). Из рис. 10 видно, что влажность наиболее выбросоопасной нижнебалахонской подсерии находится в пределах 1÷1,3%. Этот же интервал соответствует и точке бифуркации. Угли с влажностью 1,5÷2% относятся к менее выбросоопасной, но тем не менее все-таки опасной по внезапным

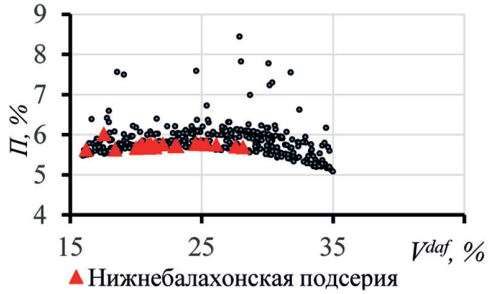

Рис. 8. Зависимость между пористостью П и выходом летучих веществ V^{daf} для значений предельной сорбционной метаноемкости $a = 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг

Fig. 8. Curve of porosity P and volatile yield V^{daf} at limiting methane adsorption capacity $a = 18 \cdot 10^{-3}$ m³/kg

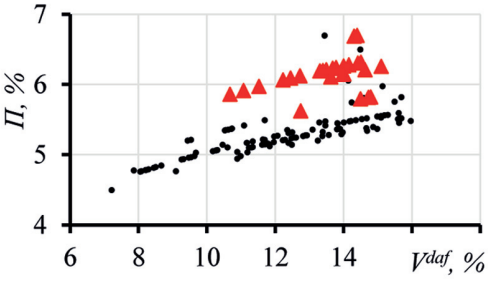

Рис. 9. Зависимость между пористостью П и выходом летучих веществ V^{daf} для значений предельной сорбционной метаноемкости $a > 18 \cdot 10^{-3}$ м³/кг

Fig. 9. Curve of porosity P and volatile yield V^{daf} at limiting methane adsorption capacity $a > 18 \cdot 10^{-3}$ m³/kg

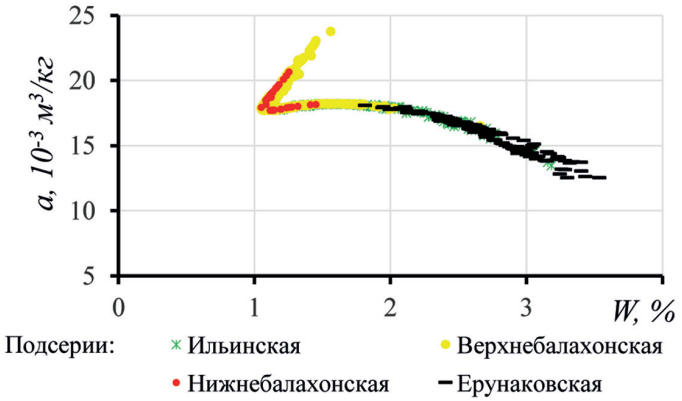

Рис. 10. Изменения предельной сорбционной метаноемкости a в зависимости от влажности W для подсерий углей Кузбасса
Fig. 10. Limiting methane adsorption capacity versus moisture content W for some coal grades in Kuzbass

выбросам Верхнебалахонской подсерии (некоторые ее пласты имеют природную влажность около 1%). При влажности более 2% предельная метаноемкость угольных пластов уменьшается, при этом и уменьшается выбросоопасность сравнительно молодых угольных пластов Ерунаковской и Ильинской подсерий [13].

Зависимость влажности от выхода летучих веществ (рис. 11) подтверждает выводы, изложенные выше: минимальную влажность (1÷1,3%) имеют угольные пласты средней стадии метаморфизма (рис. 11). Для угольных пластов с выходом летучих веществ менее 15% влажность изменяется на величину менее 0,5%, для углей с V^{daf} > 30% и бурых углей изменение влажности достигает 2,5% (от 1 до 3,5%). Рис. 11 показывает возрастание влажности угольных пластов при увеличении выхода летучих до 40—45% (бурые угли) что связано с достаточно рыхлой структурой скелета и, следовательно, с абсорбцией влаги. Известно, что в каменных углях средних стадий метаморфизма (от ОС до Ж) содержание влаги колеблется от 1 до 2%, в среднем около 1,5% [14].

Для дальнейших исследований влияния влажности на выбросоопасность угольных пластов рассчитанная нами в [1] упругая энергия расширяющегося га-

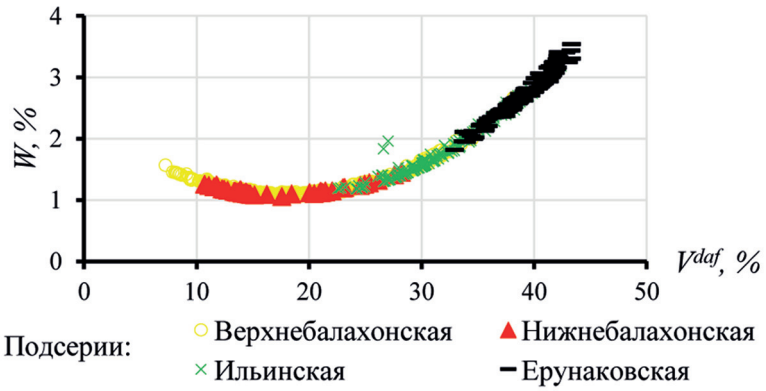

Рис. 11. Зависимость между влажностью W и выходом летучих веществ V^{daf} для углей Кузбасса
Fig. 11. Moisture content W—volatile yield V^{daf} curve for Kuzbass coal

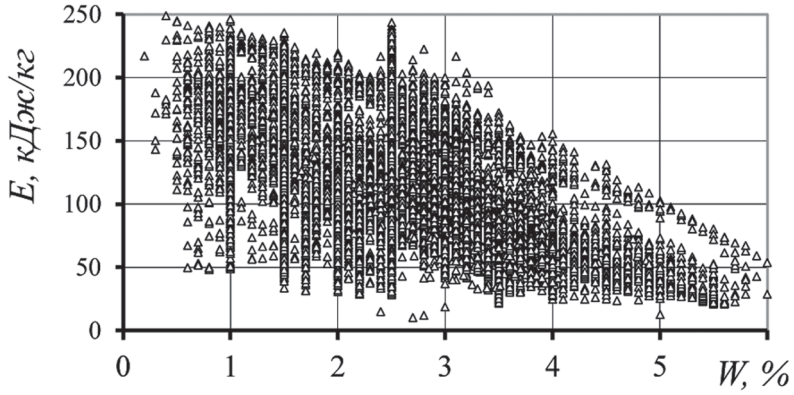

Рис. 12. Изменение упругой энергии E расширяющегося газа с увеличением влажности W угольных пластов
Fig. 12. Change in elastic energ. E of expanding gas with increasing moisture content W of coal seams

за (в Дж/кг) сопоставлялась с природной влажностью углей [6]. Результаты показаны на рис. 1. Используемая на рис. 12 «рядность» обусловлена известным округлением значений влажности при ее измерении.

В.В. Ходотом в [14] отмечается, что увлажнение угольного массива снижает выделение метана и уменьшает вероятность внезапных выбросов угля и газа. Как следует из рис. 12 при увеличении природной влажности углей упругая энергия, которую способен развивать расширяющийся газ за счет внутреннего разрушения, уменьшается.

Рис. 12 подтверждает известный факт снижения газодинамической активности пласта при увлажнении газоугольного пласта. Следовательно, уменьшается склонность угольного массива к внезапным выбросам угля и газа. Это позволяет рассчитать оптимальные условия увлажнения для снижения энергии газовой компоненты угольного пласта.

По модели Ван-Кревелена и Ж. Шуера, изложенной и дополненной в [15] молекула угля представляет собой ароматическое ядро и боковые цепочки из CO, CH_2, NH и др. Рассматривая сорбцию молекул угля с метаном и водой, В.В. Ходот показал, что молекулы воды обладают бóльшим «сродством» к поверхности угля, чем молекулы метана с его «сферически симметричными оболочками» [14]. Таким образом, влажность угля снижает его сорбционную способность к метану, а, следовательно, и его метаноемкость. Вода занимает преимущественно поверхность ископаемых углей и не дает «садиться» на эту поверхность метану. В работе В.В. Ходота [14] в 1953 г. было отмечено, что различия во влажности углей очень мало влияют на их сорбционную метаноемкость. Но, как показали дальнейшие работы, в том числе и В.В. Ходота [15], влияние влажности углей оказалось более значимым.

Одной из задач горной практики является задача управления процессом увлажнения угольных пластов с целью профилактики внезапных выбросов. Поэтому необходимо установить закономерности «внедрения» воды в уголь при его увлажнении и на их основе рассчитать оптимальные условия увлажнения для конкретных горно-геологических условий. Процесс газовыделения из угольных пластов можно представить как последовательность процессов диффузии газа из тонких пор в трещины угля и фильтрации его из трещин в выработку. В неразгруженном угольном пласте трещины сжаты

геостатическим давлением, концентрации газа в тонких порах угля и в трещинах практически одинакова и скорость газовыделения из угольного массива пропорциональна газопроницаемости угля.

При разгрузке угольного пласта давление в трещинах падает и скорость газовыделения начинает определяться диффузией газа в тонких порах. В этот момент по мере увлажнения угольного пласта и проникновения воды в поры угля внутреннее давление заключенного в них газа возрастает. С возрастанием давления газа в порах растет растворимость метана в воде. Это может привести к более глубокому проникновению воды в уголь и диффузии метана через воду из угля, т.е. к его дегазации. При невысоких перепадах давления между водой и газом в угле вода равномернее смачивает его поверхность и проникает в тонкие поры. При разрушении угля вода удерживается в тонких порах за счет капиллярных сил, что снижает скорость газовыделения [15]. Таким образом, меняя давление и длительность воздействия воды на угольный пласт можно получить различные эффекты: добиваться «торможения» газовыделения или дегазировать угольный пласт.

Влага в угле быстрее забирает тепло и передает его метану, следовательно, быстрее понижает температуру угля и не позволяет ему нагреваться. С другой стороны, вода способствует набуханию и растрескиванию угля, что в свою очередь увеличивает скорость распада вещества угля и в конечном счете количество десорбирующегося метана.

Полученные автором практические результаты по 15 396 пластопересечениям 11 месторождений Кузбасса (рис. 12) показывают, что увеличение влажности угольного пласта даже на 2% практически вдвое снижает энергию его газовой компоненты.

Заключение

В точках бифуркации параметров сорбционной метаноемкости (при величине предельной метаноемкости $18 \cdot 10^{-3}$ м^3/кг для Кузнецкого и $18{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^3/кг для углей Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов) углеметановый пласт генетически способен сформировать возмущающий газодинамический импульс, достаточный для развития его саморазрушения. Эти качества объясняют внезапность выбросов угля и газа.

При этом пористость угольных образцов, измеренная в лаборатории, составляла ~6%, а аналитическая влажность 1÷1,3%. При таком сочетании этих физико-химических параметров, в соответствии с каталогами, угольные пласты с предельной метаноемкостью ~$18 \cdot 10^{-3}$ м^3/кг для Кузбасса имели наибольшее количество выброшенного угля и газа с 1943 г. по настоящее время.

Угольные пласты, имеющие значения предельной метаноемкости больше или меньше $18 \cdot 10^{-3}$ м^3/кг, но те же значения пористости и влажности являются менее выбросоопасными (по данным горной практики).

Но и при работе таких производительных забоев газ начинает выделяться из отбиваемого угля в режиме, близком к выбросоопасности, т.к. высока начальная скорость газоотдачи. Поэтому на этих шахтах также необходима активная дегазация пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Khavkin A.Y.* On the interaction of thermal and strain-wave processes in coals. Int. J. Nanotechnol., 2018. Vol. 15, Nos. 4/5. P. 301—310.

2. *Адушкин В.Н., Опарин В.Н.* От явления знакопеременной реакции горных пород на динамическое воздействие — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах //

ФТПРПИ. — Ч. I. — 2012. — № 2. — С. 3—27; Ч. II. — 2013. — № 2. — С. 3—46; Ч. III. — 2014. — № 4. — С. 10—38; Ч. IV. — 2016. — № 1. — С. 3—49.

3. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.

4. *Опарин В. Н., Журавков М. А., Потапов В. П. и др.* Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах. Т. 1. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. — 540 с.

5. *Oparin V. N.* Theoretical Fundamentals to Describe Interaction of Geomechanical and Physicochemical Processes in Coal Seams // Journal of Mining Science, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 201—215.

6. *Опарин В. Н., Адушкин В. В.* Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности. Ч. II: Влияние геотермических, геодинамических и физико-химических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 10. — С. 5—29.

7. *Wang Kaixing, Dou Linming, Pan Yishan* Study of tunnel roof anti impact and energy absorption effect on block overburden rock mass failure // Journal of China University of Mining and Technology. 2017, Vol. 46, No. 6, pp. 1212—1217.

8. *Zhou A. T.*, Wang K., *Oparin V. N.* Regularities of Two-Phase Gas Flow under Coal and Gas Outbursts in Mines // J. Mining Sci. 2017. Vol. 53, No 3, pp. 533—543.

9. *Zuzana Weishauptová, Oldřich Přibyl, Ivana Sýkorová, Vladimír Machovič*. Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption // Fuel, 2015, 139, pp. 115—124.

10. *Kiani A., Sakurovs R., Grigore M., Sokolova A.* Gas sorption capacity, gas sorption rates and nanoporosity in coals // International Journal of Coal Geology, 2018. 200, pp. 77—86.

11. *Sakurovs R., Koval L., Grigore M., Sokolova A., Ruppert L. F., Melnichenko Y. B.* Nanometre-sized pores in coal: Variations between coal basins and coal origin // International Journal of Coal Geology, 2018. 186, pp. 126—134.

12. Staib, G., Sakurovs, R., Gray, E.M.A. Dispersive diffusion of gases in coals. Part I: Model development // Fuel, 2015, 143, pp. 612—619.

13. *Опарин В. Н., Киряева Т. А., Потапов В. П.* Разработка методов и моделей расчета сорбционной метаноемкости углей на основе их физико-химических характеристик // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 14—33.

14. *Ходот В. В.* Влияние влажности на газоносность ископаемых углей // Известия АН СССР. — 1952. — № 12. — С. 45—49.

15. *Ходот В. В., Яновская М. Ф., Премыслер Ю. С. и др.* Физикохимия газодинамических явлений в шахтах. — М., 1973. — 141 с.

16. *Киряева Т. А., Опарин В. Н.* Свидетельство № 2018620032 на БД. Российская Федерация. Стратиграфическое распределение ресурсов угля и метана в Кузбассе на 01.01.2010 г. Зарегистр. 09.01.2018 г.

17. *Киряева Т. А., Опарин В. Н.* Свидетельство № 2018620035 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноносности углей Кузбасса. Зарегистр. 09.01.2018 г.

18. *Киряева Т. А., Опарин В. Н.* Свидетельство № 2018620036 на БД. Российская Федерация. Каталог внезапных выбросов угля и газа в Кузбассе. Зарегистр. 09.01.2018 г.

19. *Киряева Т. А., Опарин В. Н.* Свидетельство № 2018620264 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноемкости углей Кузбасса. Зарегистр. 13.02.2018 г. ГИАБ

REFERENCES

1. Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Khavkin A. Y. On the interaction of thermal and strain-wave processes in coals. *Int. J. Nanotechnol.*, 2018. Vol. 15, Nos. 4/5. P. 301—310.

2. Adushkin V. N., Oparin V. N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. Part I. 2012, no 2, pp. 3—27; Part II. 2013, no 2, pp. 3—46; Part III. 2014, no 4, pp. 10—38; Part IV. 2016, no 1, pp. 3—49. [In Russ].

3. *Destruktsiya zemnoy kory i protsessy samoorganizatsii v oblastyakh sil'nogo tekhnogennogo vozdeystviya*. Otv. red. Mel'nikov [Earth's crust destruction and self-organization processes in

zones under strong production impact. Mel'nikov N.N. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012, 632 p.

4. Oparin V.N., Zhuravkov M.A., Potapov V.P. *Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gorno-tekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh* [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical research into initiation and growth of source zones of disastrous events in mining and in nature]. Vol. 1. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2018, 540 p.

5. Oparin V.N. Theoretical Fundamentals to Describe Interaction of Geomechanical and Physicochemical Processes in Coal Seams. *Journal of Mining Science*, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 201—215.

6. Oparin V.N., Adushkin V.V. Regional clustering of coal fields in Kuzbass with respect to gas-dynamics activity. part ii: influence of geothermal, geodynamic and physicochemical processes. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 10, pp. 5—29. [In Russ].

7. Wang Kaixing, Dou Linming, Pan Yishan Study of tunnel roof anti impact and energy absorption effect on block overburden rock mass failure. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2017, Vol. 46, No. 6, pp. 1212—1217.

8. Zhou A.T., Wang K., Oparin V.N. Regularities of Two-Phase Gas Flow under Coal and Gas Outbursts in Mines. *J. Mining Sci.* 2017. Vol. 53, No 3, pp. 533—543.

9. Zuzana Weishauptová, Oldřich Přibyl, Ivana Sýkorová, Vladimír Machovič. Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption. *Fuel*, 2015, 139, pp. 115—124.

10. Kiani A., Sakurovs R., Grigore M., Sokolova A. Gas sorption capacity, gas sorption rates and nanoporosity in coals. *International Journal of Coal Geology*, 2018. 200, pp. 77—86.

11. Sakurovs R., Koval L., Grigore M., Sokolova A., Ruppert L.F., Melnichenko Y.B. Nanometre-sized pores in coal: Variations between coal basins and coal origin. *International Journal of Coal Geology*, 2018. 186, pp. 126—134.

12. Staib, G., Sakurovs, R., Gray, E.M.A. Dispersive diffusion of gases in coals. Part I: Model development. *Fuel*, 2015, 143, pp. 612—619.

13. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Potapov V.P. Methods and models for analyzing methane sorption capacity of coal based on its physicochemical characteristics. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no 4, pp. 14—33. [In Russ].

14. Khodot V.V. The effect of humidity on the gas content of fossil coal. *Izvestiya Akademii nauk SSSR*. 1952, no 12, pp. 45—49. [In Russ].

15. Khodot V.V., Yanovskaya M.F., Premysler Yu.S. *Fiziko-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physicochemistry of gas-dynamic phenomena in mines], Moscow, 1973, 141 p.

16. Kiryaeva T.A., Oparin V.N. Certificate of state registration of database *RU 2018620032*, 09.01.2018 г.

17. Kiryaeva T.A., Oparin V.N. Certificate of state registration of database *RU 2018620035*, 09.01.2018.

18. Kiryaeva T.A., Oparin V.N. Certificate of state registration of database *RU* 2018620036, 09.01.2018.

19. Kiryaeva T.A., Oparin V.N. Certificate of state registration of database *RU 2018620264*, 13.02.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киряева Татьяна Анатольевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, e-mail: coalmetan@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

T.A. Kiryaeva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia, e-mail: coalmetan@mail.ru.