© В.Н. Опарин, Т.А. Киряева, 2015

УДК 622.272.6

В.Н. Опарин, Т.А. Киряева

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВЫБРОСО- И ПОЖАРООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ КУЗБАССА[*]

Показано, что существует генетическая связь между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов Кузбасса различных стадий метаморфизма, обусловленных спецификой геомеханико-геодинамических и термо-химических условий их формирования для минувших тектоно-магматических эпох в развитии Земли. Отмечено, что решение проблем выбросо- и пожароопасности угольных месторождений должно основываться на учете реально существующей тесной связи между геомеханическими и физико-химическими массообменными процессами в многофазных угольных пластах разной стадии метаморфизма при их отработке на заданных глубинах и температурном фоне. Экспериментально доказано: ИК-радиометрия позволяет дистанционно и оперативно контролировать изменение напряженно-деформированного состояния угольных образцов при их нагружении в реальном масштабе времени; имеет место рост внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля, связанной с силой внезапных выбросов угля и газа отрабатываемых угольных пластов и соответственно с внутренней энергией упругой релаксации углеметана; существует «единая зависимость» потери массы (Δm) угольных образцов при изменении их температуры с выделением, преимущественно, двух диапазонов: от примерно 40 до 60 °С (T_1) и 480–500 °С (T_2). Изменение массы образцов угля в диапазоне температур T_2 связано также с внутренней энергией релаксации метаноносности продуктивных пластов; удаление летучих форм угольного вещества в образцах сопровождается энфоэффектами; со временем хранения образцов угля после их извлечения из продуктивных пластов наблюдается ослабление связи газовой компоненты в углеметановом веществе (в т.ч. связь метана с веществом угля).

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, температура, уголь, выход летучих, удельная поверхность, структура, пористость, плотность, окисление, горение, выбросоопасность, стадии метаморфизма.

Введение

Проблема выбросо- и пожароопасности угольных пластов, безусловно, относится к старейшим и важнейшим для нескольких отраслей промышленности, в частности, и угольной. Несмотря на более чем столетний период изучения, на разработку в течение последних примерно тридцати лет нормативных решений по прогнозированию и предотвращению эндогенных пожаров [1], природа самовозгорания углей, к сожалению, пока остается невскрытой.

В последние десятилетия российскими учеными активно развиваются представления о свойствах углеметанового пласта как твердого углегазового раствора [2]. С открытием волн маятникового типа, изучением деформационно-волновых процессов в окрестностях горных выработок наступил новый этап в понимании реальной сложности решения пробле-

[*] Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673), партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН-3.1, и с использованием оборудования ЦКП ГГГИ СО РАН.

мы обеспечения безопасных условий ведения горных работ при освоении полезных ископаемых на глубоких горизонтах, возникновением нового направления исследований – геомеханической термодинамики [3].

В выполненных нами исследованиях, представленных в данной работе, основное внимание уделяется влиянию совокупности основных факторов, при наличии которых создаются реальные условия для возникновения выбросов угля и газа. Наиболее существенными из них рассматриваются, в частности, блочно-иерархическое строение горных пород, неоднородность их физико-механических свойств, изменения температуры, влажности, глубины отрабатываемых горизонтов угольных месторождений Кузбасса.

Направление настоящих исследований авторов статьи ориентировано на моделирование и изучение геомеханических и газодинамических особенностей протекания сложных процессов в углеметановой среде с учетом новых знаний о свойствах многокомпонентных геоматериалов.

При этом нами уделено большое внимание разработке комплексного метода оценки газодинамической активности углеметановых пластов. В качестве базовых рассматривались, в первую очередь, горно-геологические условия Кузнецкого угольного бассейна, горнотехнологические особенности освоения которого достаточно многообразны и широко известны [4].

О связи между напряженно-деформированным состоянием угольных образцов и температурой: основные положения, методика и результаты лабораторных экспериментов

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде указанного раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердой компоненты пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности. Чем выше газоносность угольного пласта, тем интенсивнее газодинамическая деструкция, вплоть до его саморазрушения в форме внезапного выброса угля и газа. При равной газоносности наиболее склонны к саморазрушению угли средней стадии метаморфизма. Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности. Это раскрывает один из возможных подходов к оценке свойств многокомпонентных геоматериалов на основе измерения удельной поверхности проб углей, отобранных, применительно к решаемой задаче, при различных значениях потенциальной энергии газовой компоненты твердого углегазового раствора (ТУГР).

В проведенных нами экспериментах [5] впервые в качестве одного из элементов метода реализации указанного подхода использовались приборы DigiSorb 2600 («Micromeritics», США), AutoPycnometer-1320 («Micromeritics», США), NETZSCH STA 449C Jupiter («NETZSCH», Германия), СОРБИ-М («META», Россия) для измерения внутренней удельной поверхности и объема микропор, полного объема пор, получения полной изотермы адсорбции/десорбции при изучении физико-химических свойств угля и газокинетических характеристик углеметановых геоматериалов.

Инфракрасная термография, основанная на зависимости мощности инфракрасного излучения с поверхности контролируемого тела от его температуры, открывает новые возможности для исследования особенностей изменения температурных полей наблюдаемых физических объектов [6]. В лабораторных экспериментах нами использовался компьютерный тепловизор ТКВр – ИФП «СВИТ», разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН [7], который предназначен для исследований в реальном масштабе времени (рис. 1). Испытания механических свойств образцов угольного керна проводились в ЦКП ИГД СО РАН на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802.

Рис. 1. Тепловизионная камера (а) и портативный компьютер с программным обеспечением (б) по [7]

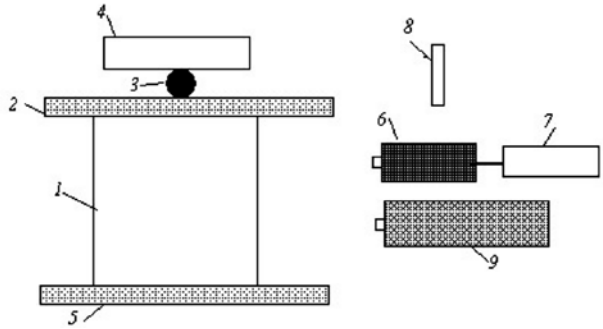

Рис. 2. Схема экспериментально-измерительной установки: 1 – угольный образец; 2, 5 – стальные пластинки; 3 – шариковая опора; 4 – подвижная траверса; 6 – тепловизор; 7 – компьютер; 8 – комнатный термометр; 9 – комплекс ALMEC-tv

Испытывались угольные образцы высотой около 5 см и сечением 25 см^2. В экспериментах использовалась специально созданная металлическая камера, расположенная на высоте 1,5 м над уровнем пола, с регулируемым от пресса давлением, в которой находится экспериментально-измерительная установка (рис. 2). Камера является оптически прозрачной со стороны дистанционно сканируемых поверхностей испытуемых образцов.

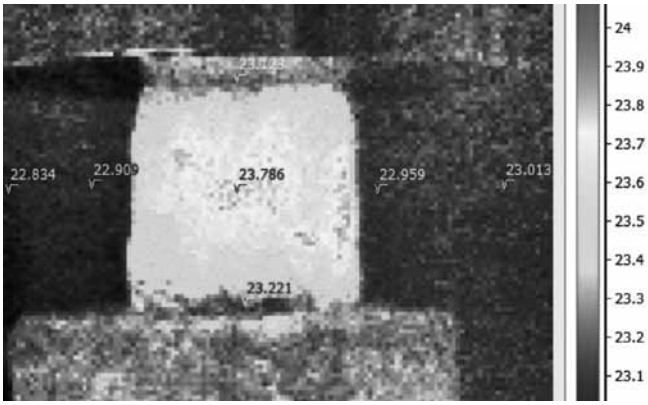

Рис. 3. Тепловое изображение образца угля с метками температуры на поверхности перед его разрушением

В выполненных экспериментах были измерены термограммы для 9-и образцов трех шахтопластов Кузбасса с различными физико-химическими свойствами (газоносность 13–20 м^3/т, выход летучих веществ 20–36%, глубина залегания пластов 200–600 м).

На рис. 3 приведено типичное распределение температуры в образце угля и окружающем пространстве перед его разрушением. На термограмме также указаны температурные метки в трех точках по вертикальной оси образца: на верхней границе, в центре и на нижней его границе.

Изменения температуры со временем нагружения были проведены по всей поверхности образца. На рис. 4 приведен типичный график термограммы.

Изменение первого инварианта тензора напряжений ΔП должно описывать вариации ИК-измерений в предположениях об адиабатичности деформирования и отсутствии значительных шумов [8]. Были получены зависимости температуры угольного образца от уровня задаваемого напряжения на его границах, в центре, а также по горизонтальной оси (рис. 5, 6).

Как видно из приведенных графиков, при возрастании уровня напряжений образцов вариации температуры и, соответственно, интенсивности ИК-излучения увеличиваются. Полученные нами результаты экспериментально подтверждают выводы [9] о том, что приращение тензора напряжений прямо пропорционально приращению температуры для образцов угля с различными физико-химическими свойствами. В [5] было показано, что при ΔП = 40 МПа в «идеально упругом» образце угля приращения температуры должны составлять ΔТ = 0,003 К. Однако в экспериментах на углеметановых образцах это приращение оказалось на два порядка величины больше (около 0,3 К), что можно объяснить развитием нелинейных [10] деформационно-волновых процессов на микроструктурном уровне внутри образцов, ранее не учитываемых.

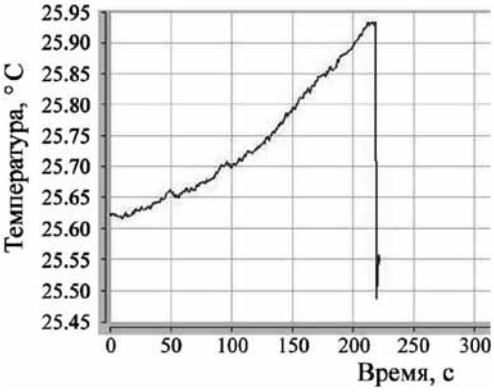

Рис. 4. Зависимость температуры от времени нагружения в центре одного из образцов угля

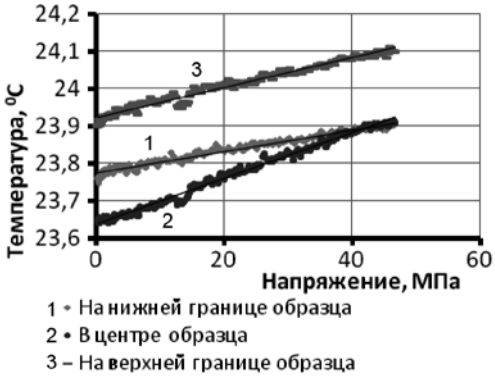

Рис. 5. Зависимость температуры образца от напряжения до разрушения: на нижней границе образца; в центре; на верхней границе

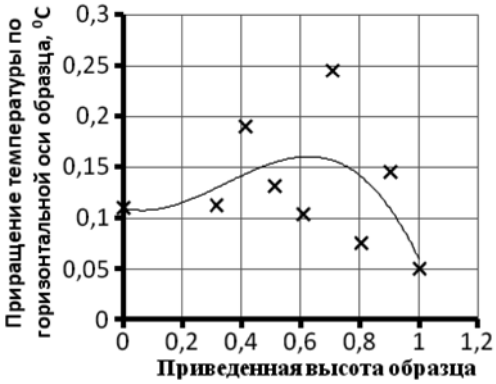

Рис. 6. Распределение приращения температуры по горизонтальной оси образца угля при его нагружении перед разрушением

Таким образом, по изменению температуры образца угля можно количественно оценивать изменение его напряженно-деформированного состояния. Более того, как оказывается, при нагружении образца в процессе его деформирования происходит выделение добавочной кинетической энергии, что согласуется с введением в [3] понятия «геомеханическая температура».

Влияние температуры и микроструктуры угольного вещества в энерго-массообменных процессах: изменение массы, выхода летучих, удельной поверхности частиц угля, внутренней энергии релаксации метаноносности и влагосодержания

Важной характеристикой газодинамической активности угольных пластов является пористая структура ископаемых углей, обладающих запасенной внутренней энергией релаксации системы (E) при переходе ее из одного метастабильного состояния в другое.

При нарушении исходных геомеханического и термодинамического равновесных состояний угольных пластов в результате ведения горных работ, как следует ожидать, начнет проявлять себя активно трещиноватопористая структура угольного вещества в инициируемых энерго-массообменных процессах как между продуктивными пластами и вмещающими породами, так и внутри слагающих их геоматериалов. Уровень такой «активности», безусловно, будет зависеть от реальных значений «напряжений-деформаций» и температур, испытываемых геовеществом углепородных массивов, а также их пространственными градиентными свойствами. Последние в значительной степени определяются как макро-, так и микроструктурными свойствами – блочно-иерархическим

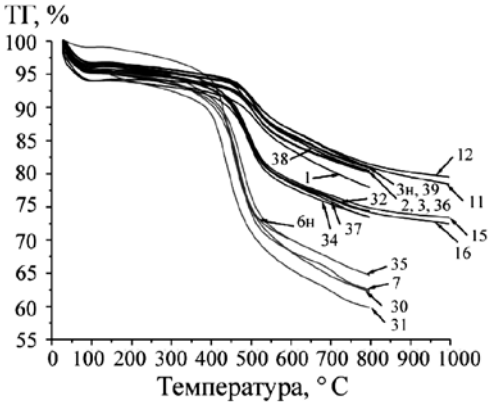

Рис. 7. Процентное изменение веса ТГ для всех исследованных образцов природных углей с ростом температуры (номера образцов указаны на рисунке)

строением многофазных углепородных массивов.

По всем исследованным образцам природных углей был проведен термический анализ (ТГ) для определения оставшейся массы образца при его нагревании (первоначальная масса взята за 100%). Как видно из рис. 7, все образцы теряют в весе при нагреве, но с разной интенсивностью в явно выделяющихся разных интервалах температур: до 40–50 °С, до 400–500 °С и более. Таким образом, в целом вся совокупность экспериментальных данных распадается на типовые для трех серий образцов.

Исследования показали, что потеря массы Δm (в % от первоначальной) для большинства угольных образцов происходит преимущественно в двух температурных интервалах: Δm_1 при 40–50 °С (T_1) и Δm_2 при 440–510 °С (T_2).

На рис. 8 приведены корреляционные зависимости изменения Δm_2 от температуры T_2 (*а*) и выхода летучих веществ V^{daf} (*б*). Видно, что исследуемые образцы углей содержат разные формы летучих компонентов, которые можно условно разделить на «сильно» и «слабосвязанные» со струк-

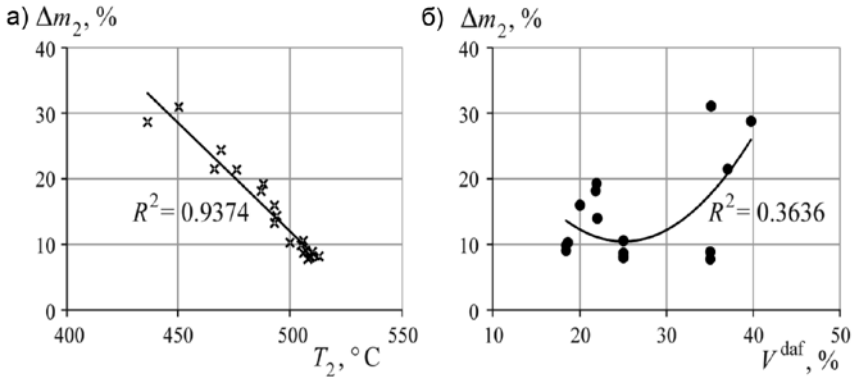

Рис. 8. Зависимости изменения массы Δm_2 проб исследованной серии углей Кузбасса: а) – от температуры; б) – от выхода летучих веществ

турой, или зависящими от собственных физико-химических свойств. Свойства этих летучих форм проявляются и характеризуются температурой удаления. Следовательно, для одних образцов (30, 31) превалируют слабосвязанные формы, а для других (1, 1 Н, 3, 11,12) – относительно прочные. Зависимость Δm_2 от выхода летучих веществ показывает, что относительно прочные связи характерны для углей с V^{daf} от 18 до 25%.

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде этого раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердой компоненты угольного пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности.

Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет упругой энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности.

Исследование проб углей с выходом летучих веществ от 18% до 43% для 5 шахтопластов Кузбасса позво-

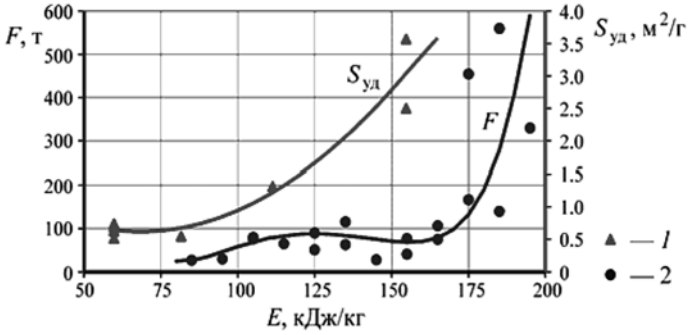

Рис. 9. Зависимость удельной поверхности угля Syд и силы внезапных выбросов F от внутренней энергии углеметана E: 1 – экспериментальные значения удельной поверхности угля; 2 – усредненные статистические данные силы выброса

лило эмпирически установить зависимости роста внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля $S_{уд}$ для разных по коэффициенту f крепости угля (по М.М. Протодьяконову), а также силы F внезапных выбросов угля и газа (рис. 9) от внутренней энергии углеметана E [11].

Близкая к отмеченной связь с внутренней энергией углеметана была установлена и по отношению к силе внезапных выбросов угля и газа (ВВУГ). Для этого были собраны и обработаны статистические данные шахт Карагандинского, Кузнецкого и Печерского бассейнов о зарегистрированных в период с 1943 г. по настоящее время 197 случаях внезапных выбросов. Из этой выборки исключены выбросы силой менее 20 т, т.к. эти газопроявления по их механизму принято относить к слабым газодинамическим явлениям. Оставшиеся 114 случаев распределены по группам с градацией по внутренней энергии углеметана через 10 кДж/кг. В каждой группе определена средняя сила выброса. Полученные результаты представлены на рис. 9.

Таким образом, изменение величины внутренней удельной поверхности частиц угля (деструкция) и интенсивность саморазрушения пласта имеют близкий физический механизм, связанный с реализацией упругой энергии газовой компоненты геоматериала.

Оперативное решение задач обеспечения газовой безопасности шахт требует применения экспресс-методов. Одним из таких методов диагностики геомеханического состояния пластов угля может являться метод заблаговременного определения удельной поверхности проб углей, отобранных в том числе и в действующих забоях.

Исследования показали, что со временем хранения угля (рис. 10) ослабевают связи в углеметановом веществе, в том числе и связь метана с веществом угля. У проб углей со временем хранения 12 лет потери массы при нагревании до 500 °С почти в 3 раза больше, чем при их хранении в течение года. Это подтверждает и зависимость внутренней энергии релаксации метаноносности E от изменения массы угля. На рис. 11 приведена корреляционая зависимость внутренней энергии релаксации метаноносности и изменения массы угольных образцов при T_2.

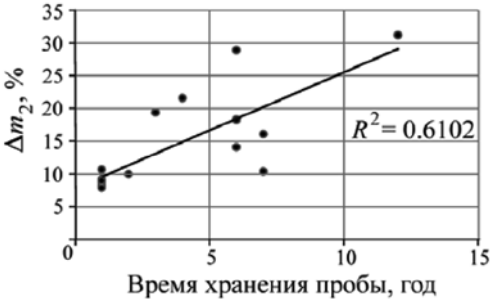

Рис. 10. Зависимость потери массы проб углей при 500 °С от времени их хранения

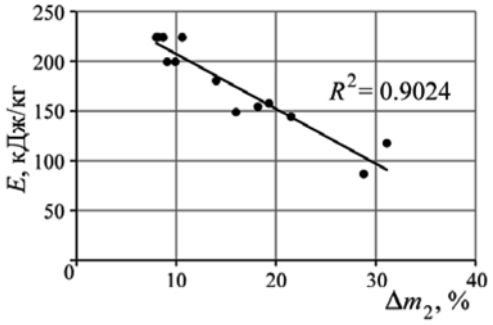

Рис. 11. Взаимосвязь значений внутренней энергии релаксации метаноносности (Е, кДж/кг) и изменения массы (Δm_2) угольных образцов Кузбасса

Видно, что наличие в образцах трудноудаляемых («сильно» связанных) форм летучих компонентов (пробы 1, 3, 38, 39) приводит к росту энергии релаксации метаноносности, и наоборот – легкоудаляемые формы

(пробы 30, 31) обладают меньшими величинами *E*.

В настоящее время можно лишь предположить, что это обусловлено различной способностью метана растворятся в этих формах «жидкоподобных» компонентах каменных углей, что требует дополнительных исследований. С другой стороны, как показано в [12], внутренняя энергия углеметана максимальна для углей средней стадии метаморфизма. Образцы с прочными видами связи имеют выход летучих от 18 до 25% и относятся к средней стадии метаморфизма угля, которая является наиболее выбросоопасной.

Обсуждение результатов лабораторных экспериментов в сравнении с данными натурных наблюдений

На рис. 7 первый температурный интервал (40–50 °С) условно можно идентифицировать как «геомеханический». Как экспериментально показано в работе [13], при отработке угольных месторождений, этот температурный диапазон и несколько более нередко достижим в зонах

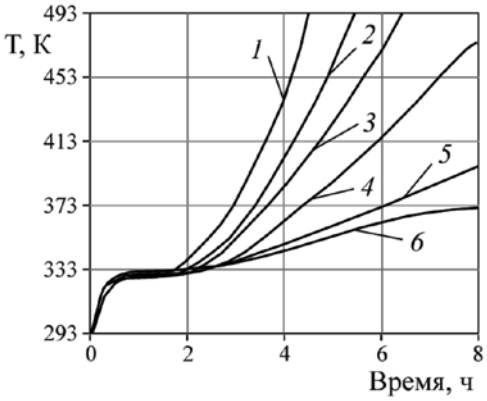

Рис. 12. Изменение температуры угля при окислении в зависимости от величины влагосодержания воздуха, кг/кг: 1 – $11{,}5\cdot10^{-3}$; 2 – $15{,}0\cdot10^{-3}$; 3 – $20{,}0\cdot10^{-3}$; 4 – $29{,}0\cdot10^{-3}$; 5 – $48{,}8\cdot10^{-3}$; 6 – $62{,}5\cdot10^{-3}$ [13]

опорного давления. Следовательно, вокруг вновь образуемых обнажений угольных пластов в таких термодинамических условиях необходимо реально учитывать индуцирование горными работами в массиве энергомассообменных процессов вокруг выработок, где изменение общей массы Δm_1 может составлять около 4%, что весьма значительно. Этот температурный диапазон можно рассматривать как опасный по «самопроизвольному» флюидо-газовыделению слабосвязанных углеметана и жидкой фазы при ведении горных работ на соответствующих данному интервалу температур глубинах (одно из условий выбросоопасности пластов).

Так, В.А. Скрицкий в монографии [13] приводит важные для обсуждаемых нами массообменных процессов графики (рис. 12), касающиеся изменения температуры образцов угля во времени в зависимости от влагосодержания воздушной «атмосферы».

Как видно из рис. 12, приведенные здесь графики зависимостей практически единообразны (вплоть до их «слияния») на начальном временном интервале (0–2 час) с выходом (интервал 1–2 час) на «плато» при установившихся температурах окисления угля в диапазоне 50–60 °С. Далее (после 2-х часов) следует временной период при ярко выраженной «бифуркации» процессов окисления образцов угля с общей тенденцией быстрого нарастания температуры их разогрева и большого влияния влагосодержания окружающего воздуха (в данном случае в кг/кг: от $11{,}5\cdot10^{-3}$ до $62{,}5\cdot10^{-3}$) на снижение скорости роста температуры.

В тоже время, согласно [13], имеет место существенное изменение собственной влажности образцов угля в процессе их окисления на момент окончания стадии выпаривания (в среднем, от «исходной» в 5,2% до «конечной» 1,7%) при достижении тем-

пературы угля 90 °С. Стадия интенсивного химического окисления угля наступает в данном случае лишь после снижения исходной собственной влажности примерно на 70%. Отмеченным обстоятельством – «стадия интенсивного окисления с последующим переходом в стадию самовозгорания быстрее перейдет уголь с меньшей исходной влажностью» – В.А. Скрицкий объясняет высокую эндогенную пожароопасность шахт Прокопьевско-Киселевского района Кузбасса, где разрабатываемые крутые пласты угля обладают пластовой влажностью, обычно не превышающей 3,0–3,5%. «Крутые пласты» в данном случае свидетельствуют также и о приуроченности угольных шахт этого района к тектонически активному обрамлению Алтае-Саянского складчатого пояса по фактору геодинамического влияния (в частности, наличия разноуровневых разрывных нарушений).

В этой связи обратим внимание на то, что в приведенных выше данных наблюдается отличие примерно в 10 °С между температурой выпаривания влаги угольных образцов (~90 °С) и температурой кипения воды (100 °С). Подобного рода «температурные лаги», по-видимому, можно рассматривать для углей разных марок (или стадий метаморфизма) как значимые геомеханико-термохимические условия инициирования влаго-газообменных процессов в угольных массивах, приводящих к возникновению очагов самовозгорания угля.

Действительно, эту температурную зону (~90–100 °С) логично связать с условием активного выхода естественной влаги из поротрещинной структуры угля за счет их термо-химического разогрева. Однако высвобождение определенных объемов влаги из угля должно одновременно сопровождаться и возникновением зон декомпрессий внутри контролируемых объемов, некомпенсируемых действием горного давления и внутренним давлением остаточной газовой компоненты в высвобождаемом от жидкости поротрещинном пространстве. Это в результате должно приводить к встречному процессу всасывания воздуха из выработок или разломно-трещинного пространства внутри углепородного массива. Естественно, интенсивность процесса образования и размеров зон «декомпрессии» в контролируемых объемах угля будет существенно зависеть от структуры, физико-химических и механических свойств углей (марка, стадии метаморфизма) и их массивов, господствующего температурного фона и изменений напряженно-деформированного состояния пород.

При падении давления газа в порах угля происходит десорбция газа и его расширение, связанные с поглощением теплоты адсорбции и падением внутренней энергии расширяющегося газа; падение температуры компенсируются притоком тепла от окружающей среды, причем интенсивность этого процесса тем выше, чем больше удельная поверхность угля.

Влага в угле быстрее забирает тепло у угля и передает его метану, следовательно, быстрее понижает температуру угля и не позволяет ему нагреваться [14]. С другой стороны, вода способствует набуханию и растрескиванию угля, что в свою очередь увеличивает скорость распада ТУГР и, в конечном счете, количество десорбирующегося метана. Процессы расширения приобретают тем большую скорость, чем больше пористость угля. В процессе десорбции потеря тепла при охлаждении метана «мгновенно» компенсируется за счет притока тепла из воды.

Поскольку, как показано нами выше, вклад собственно горного давления в изменение диапазона температур сравнительно невелик, то профилактические меры по борьбе

с внезапными выбросами угля и газа в подобного рода геомеханико-термодинамических условиях отработки угольных пластов могут быть связаны либо с использованием технологий понижения господствующего температурного фона угольного массива в зонах влияния очистных работ, либо обеспечения «плавного перехода» температурного фона за пределы зоны значений температур (40–50 °С) – в более высокотемпературную зону. Последнее обстоятельство, на первый взгляд, можно рассматривать как довольно парадоксальное.

Однако оно по существу перестает быть таковым, если обратим наше внимание на второй (рис. 7) температурный интервал (440–510 °С), для которого потеря исходной массы для Δm_2 достигает в среднем около 15%. Этот температурный диапазон примечателен тем, что с ним связаны процессы самовозгорания и горения угля на подземных горизонтах. Поэтому, так же условно, его можно назвать зоной высокотемпературных физико-химических процессов в углепородных массивах.

На первый взгляд, это совершенно разные процессы и отвечающие им температурные зоны. И, следовательно, к проблеме выбросоопасности угольных пластов температурный диапазон 440–510 °С имеет как будто бы слабое касательство. Тем не менее, по-нашему мнению, глубинная связь здесь существует и на нее до сих пор, по-видимому, не обращали внимание. Наличие практически единых зависимостей, представленных на рис. 7–8, может свидетельствовать (с учетом отмеченного) о том, что на самом деле пожаро- и выбросоопасность угольных пластов – следствие единого геомеханико-термодинамического и физико-химического процесса, происходящего в угольных пластах при их отработке. В определенном смысле он должен быть квазиобратимым к тем энерго-массообменным процессам, что испытали исходные органогеннонасыщенные осадочные отложения в геологический отрезок времени их формирования по стадиям метаморфизма. По представлениям В.Н. Опарина [15], в основе формирования месторождений углеводородного ряда (графит → угли → → асфальтены → нефть → газ,...), сопряженного с магматическими месторождениями, лежит именно этот единый геомеханико-термодинамический и физико-химический процесс (геокрекинговый механизм), реализовавшийся в известные крупные тектономагматические эпохи истории развития Земли). С этих позиций графики, типа представленных на рис. 7, содержат информацию о геомеханико-геодинамических, термодинамических и физико-химических условиях формирования угольных пластов для конкретных угольных районов Земли.

Таким образом, согласно рис. 7, возникновение и развитие очагов самовозгорания угля в глубине массива по существу должно способствовать понижению уровня выбросоопасности угольных пластов на определенных удалениях от их внешней «границы» (радиуса очага). Следовательно, отмеченному выше плавному переходу температурного фона угольных пластов за пределы опасного по выбросоопасности интервала 40–50 °С могут способствовать и подземные пожары (!). Если это так, то можно ожидать, что при определенных глубинах отработки угольных пластов рост температурного фона будет приводить к снижению уровня выбросоопасности угольных пластов.

Надо отметить, что определенные основания для подобного рода утверждений имеются, учитывая, что обсуждаемые нами геомеханические и физико-химические массообмен-

ные процессы в угольных пластах при их отработке тесно связаны с изменениями по глубине залегания их вещественно – структурных показателей и сорбционной метаноемкости.

В этом аспекте большой интерес представляют данные исследований, опубликованные в [11, 14, 16, 17]. Так, в [14] отмечено, что в зонах повышенного горного давления происходит изменение температуры в сторону возрастания.

Интересен анализ тенденции установленных связей с ростом глубины залегания пласта в точке отбора пробы угля, если принять давление газа равным гидростатическому, а температуру среды постоянной (15 °С). С ростом глубины залегания пласта от поверхности в точке отбора пробы угля (рис. 13), когда изменение давления газа близко к гидростатическому закону, а температура неизменна, среднее значение сорбционной метаноемкости углей Кузбасса на глубинах 200–400 м достигает предела, а затем снижается. Введение поправки на рост температуры с глубиной эту особенность делает еще более ярко выраженной [18].

Возможное объяснение этой особенности, как представляется, связано с геодинамическими и с тектономагматическими условиями формирования Кузнецкого угольного бассейна. По исходным экспериментальным данным [4] получены средние глубины отбора проб углей по геологическим сериям: балахонская – 250 м; кольчугинская – 186 м.

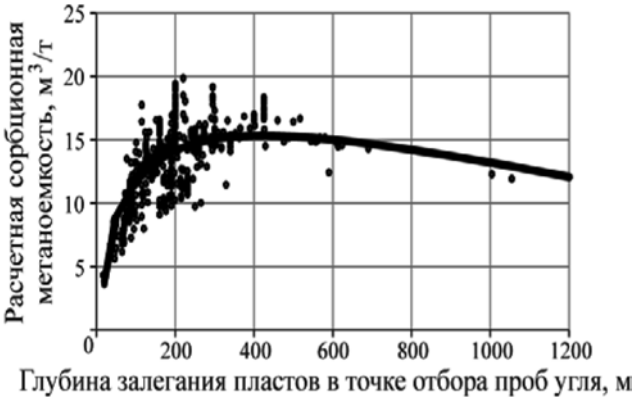

Рис. 13. Зависимость сорбционной метаноемкости углей Кузбасса от глубины залегания пластов в точках отбора проб [19]

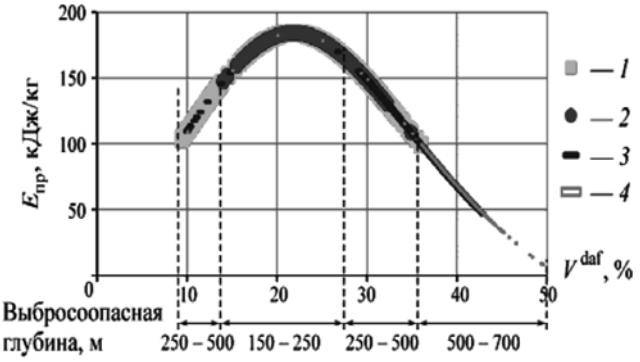

Рис. 14. Изменение предельных значений внутренней энергии релаксации для углей Кузбасса [12]: 1–4 – подсерии: 1 – верхнебалахонская; 2 – нижнебалахонская; 3 – ильинская; 4 – ерунаковская

Таким образом, рассматриваемая тенденция отражает, возможно, не только глубину, как определяющую литологическое давление и, соответственно, формирование твердых углеметановых растворов [1], но и включает особенности свойств угленосных залежей, имеющих различные геологические условия возникновения и преобразования.

О немонотонной связи между выходом летучих, предельной внутренней энергии релаксации и диапазонами глубин выбросоопасности углей Кузбасса свидетельствует рис. 14, представленный в работе [12].

Выводы

Таким образом, проведенный комплексный научный анализ геомеханического и термохимического поведения образцов углей различных стадий метаморфизма по угленосным районам Кузбасса позволяет заключить о существовании генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов, диктуемой геомеханико-геодинамическими и термохимическими условиями формирования угольных месторождений в минувшие тектономагматические эпохи истории развития Земли. Следовательно, в отличие от существующих и доминирующих ныне подходов к моделированию процессов формирования очаговых зон катастрофических событий в массивах горных пород неорганической природы, адекватное решение проблем выбросо- и пожароопасности угольных месторождений должно основываться на учете реально существующей тесной связи между геомеханическими и физико-химическими массообменными процессами в многофазных угольных пластах разной стадии метаморфизма при их отработке на заданных глубинах и температурном фоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руководство* по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины. – Донецк: НИИГД. – 2001.

2. *Алексеев А.Д., Айруни А.Т., Зверев И.В. и др.* Свойства органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов. Диплом № 9 на научное открытие, РАЕН, 1994.

3. *Опарин В.Н.* Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / Труды 2-й Российско-Китайской конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

4. *Каталог* метаноемкости углей Кузбасса. – Кемерово: ВостНИИ, 1969.

5. *Опарин В.Н., Киряева Т.А., Гаврилов В.Ю., Шутилов Р.А., Ковчавцев А.П., Танайно А.С., Ефимов В.П., Астраханцев И.Е., Гренев И.В.* О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. – 2014. – № 2.

6. *Госорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.

7. *Ковчавцев А.П.* Тепловизор: лучше один раз увидеть // Наука из первых рук. – 2012. – № 5 (47).

8. *Опарин В.Н., Киряева Т.А.* К вопросу о возникновении температуры в углеметановых образцах при нагружении и возможных методах их контроля / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. – М.: ГИФМЛ, 1965.

10. *Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А.* О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении // ФТПРПИ. – 2013. – № 5.

11. *Киряева Т.А.* Особенности устойчивых состояний искусственных и природных угле-метановых систем / Естественные и технические науки. – 2011. – № 4.

12. *Киряева Т.А.* Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геолого-разведочным данным на примере Кузбасса. – Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011.

13. *Скрицкий В.А.* Механизм возникновения очагов самовозгорания угля в шахтах и способы их предотвращения. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2013.

14. *Киряева Т.А., Родин Р.И.* К вопросу о механизме возникновения высоких температур при разработке угольных пластов // Уголь. – 2010. – № 2.

15. *Опарин В.Н.* Геотехнологии будущего – геотехнологии «реакторного типа»: современные тенденции, научный задел, ключевые проблемы / Труды Всероссийской конференции с участием иностранных участников «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». Т. 1. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

16. *Рац М.В.* Неоднородность горных пород и их физических свойств. – М.: Наука, 1968.

17. *Полевщиков Г.Я. Киряева Т.А.* Энергия релаксации сорбционной метано-

емкости углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – Тематическое приложение МЕТАН.

18. *Рудаков В.А., Киряева Т.А.* Особенности сорбционной метаноемкости углей Кузбасса // Вопросы безопасности труда на горных предприятиях. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – Выпуск № 2. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Опарин Виктор Николаевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. отделом, *e*-mail: oparin@misd.nsc.ru,
Киряева Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, докторант, *e*-mail: coalmetan@mail.ru,
Институт горного дела СО РАН.

UDC 622.272.6

GENETIC CAUSES OF OUTBURST HAZARD AND FIRE RISK IN COAL BEDS IN KUZBASS

Oparin V.N.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Head of Department, *e*-mail: oparin@misd.nsc.ru,
Kiryaeva T.A.[1], Candidate of Technical Sciences, Doctoral Candidate, *e*-mail: coalmetan@mail.ru
[1] Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

The authors have carried out the research to display the genetic affinity of the outburst hazard and fire risk in different rank coal beds in Kuzbass, resulting from specificity of geomechanical–geodynamic and thermochemical conditions and their evolution features during the orogenesis of the Earth ("geo-cracking" mechanism of hydrocarbon deposit formation by V.N. Oparin). It is emphasized that, as distinguished from the existing and dominating approaches to modeling formation of source zones of the disastrous events in inorganic-nature rock masses, the adequate solution of the problems on outburst hazard and fire risk in coal fields must be based upon the actual close relationship of the geomechanical and physicochemical mass-transfer processes running in different rank multiphase coal beds in the course of mining at the predetermined depth and temperature.

It has experimentally been proved that: infrared radiometry allows remote control of the change in the stress–strain state of coal specimens under real-time loading; growth of inner specific surface area takes place in broken coal particles, associated with the force of coal and gas outbursts during mining and, consequently, with the internal energy of elastic relaxation of coal–methane; there is a "uniform" relationship between the mass loss Δm *and temperature of coal specimens, within two marked ranges:* T_1*, from 40 to 60 °C and* T_2*, from 480 to 500 °C. The coal mass loss within* T_2 *is also connected with the internal energy of relaxation of coal methane; devolatalization goes with endo-effects; in course of storage time of coal specimens after extraction from productive strata, weakening of the gas component in the coal–methane substance is observed (including the connection of methane and coal).*

Key words: stress–strain state, temperature, coal, volatile yield, specific surface, structure, porosity, density, oxidation, combustion, outburst hazard, coal ranks.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted with partial support from the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 13-05-00673, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Integration Project No. 100 and Project ONZ RAN-3.1, with the equipment thanks to Geomechanical, Geophysical and Geodynamic Measurement Shared Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po preduprezhdeniyu i tusheniyu endogennykh pozharov na ugol'nykh shakhtakh Ukrainy* (Manual on spontaneous fire prevention and combating in coal mines in Ukraine), Donetsk, NIIGD, 2001.

2. *Alekseev A.D., Airuni A.T., Zverev I.V. Svoistva organicheskogo veshchestva uglya obrazovyvat' s gazami metastabil'nye odnofaznye sistemy po tipu tverdykh rastvorov* (Capacity of coal organic matter to form metastable single-phase systems with gases by type of solid solutions), Moscow, RAEN, 1994.

3. Oparin V.N. *Trudy 2-i Rossiisko-Kitaiskoi konferentsii «Nelineinye geomekhaniko-geodinamicheskie protsessy pri otrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na bol'shikh glubinakh»* (Proceedings of 2nd Russia–China Conference on Nonlinear Geomechanics and Geodynamics in Deep Level Mining), Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012.

4. *Katalog metanoemkosti uglei Kuzbassa* (Catalog of methane content of Kuzbass coal), Kemerovo, VostNII, 1969.

5. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Gavrilov V.Yu., Shutilov R.A., Kovchavtsev A.P., Tanaino A.S., Efimov V.P., Astrakhantsev I.E., Grenev I.V. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2014, no 2.

6. Gosorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primenenie* (Infrared thermography), Moscow, Mir, 1988.

7. Kovchavtsev A.P. *Nauka iz pervykh ruk*, 2012, no 5 (47).

8. Oparin V.N., Kiryaeva T.A. *Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoi geosredy* (Fundamental problems of production-generated environment), Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012.

9. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity), Moscow, GIFML, 1965.

10. Oparin V.N., Usol'tseva O.M., Semenov V.N., Tsoi P.A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2013, no 5.

11. Kiryaeva T.A. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2011, no 4.

12. Kiryaeva T.A. *Razrabotka metoda gazodinamicheskoi aktivnosti ugol'nykh plastov po geologo-razvedochnym dannym na primere Kuzbassa* (Method of estimating gas-dynamic activity of coal beds by geological exploration data in terms of Kuzbass), Saarbrucken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011.

13. Skritskii V.A. *Mekhanizm vozniknoveniya ochagov samovozgoraniya uglya v shakhtakh i sposoby ikh predotvrashcheniya* (Mechanisms of initiation of spontaneous fire sources in coal mines and their prevention), Novosibirsk, Izd-vo NGAVT, 2013.

14. Kiryaeva T.A., Rodin R.I. *Ugol'*, 2010, no 2.

15. Oparin V.N. *Trudy Vserossiiskoi konferentsii s uchastiem inostrannykh uchastnikov «Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoi geosredy»*, t. 1. (Proceedings of All-Russian Conference on Fundamental Problems of Geo-Environment Formation under Industrial Impact, in partnership with foreign scientists, vol. 1), Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012.

16. Rats M.V. *Neodnorodnost' gornykh porod i ikh fizicheskikh svoistv* (Heterogeneity of rocks and their physical properties), Moscow, Nauka, 1968.

17. Polevshchikov G.Ya. Kiryaeva T.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2006, special issue Metan.

18. Rudakov V.A., Kiryaeva T.A. *Voprosy bezopasnosti truda na gornykh predpriyatiyakh.* Vypusk № 2. (Issues of labor safety in mines, issue no 2), Kemerovo, KuzGTU, 2003.

НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»

Радиометрическое обогащение минерального сырья
Кобзев А.С.
Год: 2015
Страниц: 125
ISBN: 978-98672-394-5
UDK: 622.725

Рассмотрены методы радиометрического обогащения минерального сырья. Дано описание основных элементов оборудования для сепарации. Изложены последовательность работ и основы оценки обогатимости минерального сырья данной технологией. Приведен обзор и анализ развития рынка оборудования радиометрического обогащения. Большое внимание уделено опыту промышленного применения радиометрического обогащения на различных горнодобывающих и металлургических предприятиях.