

УДК 622.831.323



А. Ф. БУЛАТ,
академик НАН Украины,
доктор техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)



В. И. ДЫРДА,
доктор техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики*

На основе современных концепций нелинейной неравновесной термодинамики сформулирована модель газодинамических явлений в угольном массиве. В системе уголь – газ – влага рассматривается эволюция очага опасности. Приведены критерии теплового взрыва, так называемый критерий Семенова, а также рассмотрена роль температуры и аномальная метаногенерация.

социальные, экономические и правовые вопросы. Ее важные составляющие: понятие причин и механизма явлений (построение физических и математических моделей); динамика массива и прогнозирование его состояния; разработка технологий безопасной добычи угля. В данной работе рассмотрим первую составляющую проблемы.

Современное состояние изученности газодинамических явлений. Информацию о ГДЯ, которая будет использована при построении моделей, изложим в виде кратких обобщений.

- Причины ГДЯ: технологическая деятельность человека (95 %): 90 % – сотрясательные взрывы, 5 % – работа добывающих механизмов [4]; малые возмущения (А. Ф. Булат); скачкообразное изменение напряженного состояния вследствие техногенной деятельности; тектонические напряжения; рост трещины при НДС; превалирующая

роль газовыделения, находящегося под высоким давлением; потеря устойчивости в локальных местах угольного массива; природные землетрясения [5].

- Угли пластов, опасных по внезапным выбросам, отличаются по прочности, обладают «перемiatостью» и наличием трещин тектонического происхождения [4].

- Внезапные выбросы приурочены к узким зонам, площадь которых не превышает 5 – 10 % вынимаемой площади пластов [9]; по другим источникам – примерно 3 % [5].

- В зонах интенсивного деформирования и разрушения пород (в зонах тектонических разломов) образование высокодисперсных фракций (особенно при объемном сжатии) обладает автомодельностью и зависит от фрактальной размерности раздробленного материала; дезинтеграция угля при объемном сжа-

Газодинамические явления (ГДЯ) в угольных пластах – грозное природно-техногенное явление. Здесь природные факторы и человеческая деятельность слились в единый процесс: случайные совпадения многих факторов и малые возмущения извне приводят в действие механизм спонтанного лавинообразного выброса угля и газа из особых выбросоопасных зон. По мнению многих специалистов, без влияния человеческой деятельности газодинамические явления не происходят: это «спящая опасность», которую неосторожно разбудили, совершенно не ожидая последствий.

Динамические и газодинамические явления в шахтах – проблема междисциплинарная, охватывающая научные, технические,

* Несмотря на многочисленные публикации (некоторые из них приведены в настоящей работе [1 – 14]), предлагаемая тема для широкого круга читателей остается неисследованной. Авторы попытались рассмотреть эту важную для практики проблему в контексте современных представлений об эволюции и разрушении сложных диссипативных систем (угольный пласт – безусловно термодинамически открытая диссипативная система) с позиций нелинейной неравновесной термодинамики. Статья публикуется в порядке обсуждения.

тии предполагает более высокую долю высокодисперсных частиц [6, 7].

- Механические характеристики угля: коэффициент диссипации энергии $\psi = 0,3$; объемный модуль сжатия $K = (3...4)E$; фрактальность нормального угля $df = 2,8...2,9$; из зоны ГДЯ – $df = 2,58$ [3].

- Превышение температуры на стенке контрольной скважины на расстоянии 11,7 м от поверхности забоя $\Delta T = 13,3$ °С (средняя температура в забое 30 °С), что связано с сорбцией метана [6]; превышение температуры в зонах, опасных по внезапным выбросам, $\Delta T = 20...30$ °С [6]; по непроверенным источникам $\Delta T = 100...200$ °С и более.

- Полость после выброса: поверхность забита высокодисперсными частицами, т. е. трещины закрыты, и газ из пласта не поступает [6].

- Структура материала при выбросе: больших глыб нет; «бешеная мука» – до 40 %; наночастицы – до 10 %; в основном мелкий уголь размерами 0,2...0,4 мм [3, 4].

- Зону внезапного выброса следует рассматривать как «котел» генерации метана, о чем свидетельствуют время выброса 5...30 с, характерное для индукционного периода разрывов и перестройки химических связей, и тот факт, что монолитный уголь после выброса распыляется на микронно-дисперсные частицы [3].

- Комплексными атомарно-молекулярными исследованиями, подтвержденными физическим моделированием, установлен механизм аномальных газопроявлений при разработке угольных пластов, который состоит в генерации метана вследствие механохимической реакции его синтеза, протекающей при деструкции алифатической части угольного вещества, благоприятных термодинамических условиях и наличии соответствующих катализаторов реакции [3]. Высокое давление газа приводит к образованию микротрещины, рост которой сопровождается механоэлектрическими явлениями, генерацией метана и его дополнительной десорбцией, увеличением давления. За счет давления метана, который переходит из связанного состояния в свободное на берегах трещин в процессе их роста, может формироваться древовидная иерархическая сеть трещин (транспортных каналов). При определенных геомеханических условиях (горное давление) трещины могут развиваться в режиме «самоподдержания», т. е. их рост будет обусловлен только выделением метана, переходящего на берегах трещин из связанного состояния в свободное. Свободный метан, изначально находящийся в порах, способен обеспечить лишь скачкообразное прираще-

нение длины трещины. Главное условие – достаточная разгрузка пласта, высокая метаносность угля и низкое значение удельной энергии образования свободной поверхности [3].

- Основной объем газа при выбросе выделяется непосредственно из разрушающегося угля [6].

- Разрушение угля при внезапном выбросе угля и газа происходит с разрывом наиболее слабых связей в «бахроме» угля, в том числе отрывается большое количество метильных групп – CH_3 . Эти химически активные радикалы, объединяясь с атомами водорода, образуют метан, причем дополнительно образованные объемы метана, по оценкам реальных выбросов, составляют 40...50 м³/т [6].

Цель работы – на основе современных подходов нелинейной неравновесной термодинамики сформулировать физические модели ГДЯ с учетом доступной экспериментальной информации.

Кроме того, показать, что при возникновении ГДЯ как природно-техногенного явления в ряде случаев необходимо учитывать его важную природную составляющую, независимую от техногенной деятельности человека. Такими природными явлениями могут быть землетрясения, тектонические землетрясения, прорыв газов из глубин горного массива и т. д. В этом случае для оценки деятельности операторов необходимо использовать те же правовые нормы, что и для оценки других природных катастроф: землетрясений, торнадо, засухи и др.

Основные модели формирования, эволюции и разрушения зон ГДЯ. В настоящей работе природная газонасыщенная система уголь–газ–влага рассматривается как существенно диссипативная, нелинейная упругонаследственная и структурно-эволюционная среда, параметры которой изменяются со временем существования. Такой системе как твердому деформируемому телу присущи все свойства твердых тел. Рассмотрим их подробнее.

Локальность процесса разрушения. Локальность как особенность механизма разрушения присуща всем известным материалам. В угольном массиве с неоднородным полем напряжений накопление повреждений на поверхности и в объеме будет также неоднородным. Поэтому зарождение субмикротрещин и их эволюционный переход в микротрещины, концентрация последних и зарождение макротрещин носит вероятностный характер. Разрушение системы начинается как в объеме, так и на поверхности (очаги разрушения) локальных мест, т. е. там, где напряжения и температура максимальны.

Дискретность процесса разрушения. Это – основная черта физических, химических, биологических и других процессов, проявляется в виде скачкообразных протекающих локальных элементарных процессов, периодически повторяющихся во времени. При этом трещина увеличивается в результате критического числа единичных объемов разрушения в зоне деформации у вершины трещины; ее «скачок» становится возможным в момент их объединения. Этот механизм присущ и многим твердым телам, в том числе углям.

В устье движущейся трещины по вероятностному закону происходит слияние суб- и микродефектов, вследствие чего структура материала существенно изменяется в некотором локальном объеме; изменение структуры (с повышением концентрации повреждений) вызывает рост диссипации энергии, что вызывает еще большие структурные изменения материала; температура диссипативного разогрева в локальном объеме повышается вплоть до частичной термодеструкции; трещина временно прекращает расти и при дальнейшем деформировании, т. е. при повышении скорости накопления упругой энергии, растет скачкообразно. На поверхности разрушения угля это вызывает определенные фрактографические особенности: бороздки, гребни, следы остановки фронта трещин и т. д.

Как видно, скачкообразное движение трещины связано с влиянием диссипации, которая снижает напряжение в вершине трещины и на некоторое время приостанавливает ее рост. Этим в какой-то мере можно объяснить возникновение бороздок и ступенек скола, а также появление в местах остановки фронта трещин зон термомеханического разрушения. При задержке развития трещины в ее вершине возникает зона с сильно поврежденным материалом, т. е. образуется сплошность микродефектов. Диссипация этого локального объема резко возрастает за счет повреждаемости; температура в зоне

повышается, что подтверждается экспериментально; материал частично теряет механические свойства, после чего наступает «скачок» трещины. Длина скачка, т. е. размер ступеньки скола или расстояние между бороздками, определяется характеристиками материала и условиями разрушения.

Локальные экзотермические эффекты. Для твердых тел теоретически и экспериментально доказано, что в устье движущейся трещины температура может достигнуть уровня, характерного для теплового распада материала. Джоуль первым показал, что при растяжении образца температура повышается. Многие исследователи с помощью жидких кристаллов, а позже с помощью ИК-радиометра отметили наличие локальных экзотермических эффектов для твердых тел: Камбор для стеклообразных полимеров получил 485 К; Фуллер для ПММА – до 500 К; Е. А. Егоров для полиэтилентерефталата – 473 – 500 К; В. И. Дырда для резин – 430 – 470 К; Е. А. Егоров и В. И. Дырда для сахара – до 650 К и для графита – до 920 К [1].

По мнению исследователей, локальное повышение температуры связано с деформацией (за счет диссипации энергии при пластическом перемещении микрообластей относительно одна другой) и разрушением (за счет диссипации энергии, выделяющейся при разрыве); причем вклад второго механизма более существен: Е. А. Егоров считает его до 55 % общей энергии, Камбор – до 75 %, Вильямс – до 80 – 90 % [1].

Для углей и горных пород подобные исследования неизвестны. Однако логично предположить, что в образце угля (аналогично в угольном массиве) в устье движущейся трещины будут возникать локальные экзотермические эффекты: благодаря наличию диссипации энергии температура в областях вершины может достигать 600 – 680 °С, что предполагает существенное изменение структуры угля.

Механизм движения трещины в угольном массиве. Общеизвестно, что в твердых телах в вершине трещины (рис. 1, а) образуется зона с повышенной концентрацией напряжений. Диссипированная энергия частично уменьшает эти напряжения и возрастает в микрообъеме за счет поврежденности материала. Температура T в этом микрообъеме резко увеличивается и изменяет структуру угля вблизи трещины. Так появляются зоны с измененной структурой. В дальних от вершины зонах образуются микродефекты, концентрация которых увеличивается, и в момент их слияния (очевидно) трещина скачкообразно прорастает по «ослабленному» материалу.

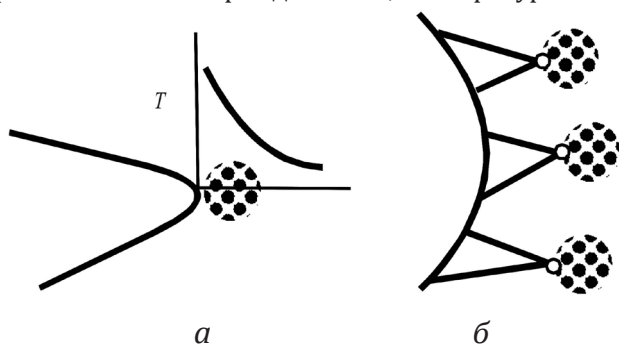


Рис. 1. К модели разрушения угля: а – развитие одиночной трещины; б – развитие ансамбля трещин.

Примерно такое же явление наблюдается и при развитии макротрещины в угольном массиве.

Макротрещина (рис. 1, б), ориентируясь в пространстве в зависимости от приложенного поля напряжений и особенностей угля, широко развивается и ее устье выражено лишь макроскопически. Микроскопически устье делится на множество трещин, которые на отдельных этапах прорастают самостоятельно, а затем сливаются. При этом в устье каждой трещины образуется локальный микрообъем ослабленного материала, и трещины получают возможность независимого движения. На определенном этапе развития трещин возможно слияние отдельных локальных микрообъемов в их вершинах и, как результат, дискретное движение макротрещины. После этого, как правило, трещина не развивается, происходит развитие отдельных микротрещин, их слияние и новый «скачок» макротрещины.

Модель в какой-то мере объясняет появление таких фрактографических особенностей, как бороздки, ступеньки скола и зоны с измененной структурой материала. Предполагается, что появление последних связано также с термической неустойчивостью материала в локальных микрообъемах. Известно, что с повышением температуры коэффициент диссипации резко возрастает. Это может повысить температуру нагрева микрообъема, что увеличивает коэффициент диссипации, и еще больше повысит температуру саморазогрева вплоть до частичной термодеструкции материала.

Механизм движения макротрещины с учетом наличия в угольном пласте метана имеет свои особенности. В нетронutom угольном массиве при установившемся равновесии метан будет находиться в свободном состоянии в порах и трещинах. При тектонических нарушениях, землетрясениях и других природных явлениях в движущихся микротрещинах метаногенерация совместно с механохимическими эффектами будет способствовать появлению микротрещин различного размера. Объединяясь под действием силовых полей, древовидный ансамбль микротрещин создает определенные зоны с измененной структурой вещества. В таких зонах появляются более высокие температура, давление газа, повышенное производство энтропии, и все химические реакции будут проходить более ускоренно. Геометрические размеры зон будут диктоваться размерами макротрещины, горным давлением, структурой угля, наличием свободного метана и т. д.

Термодинамические предпосылки к формированию и эволюции зон ГДЯ. Согласно флуктуационно-диссипативной теореме Гленсдорфа – Пригожи-

на [1] критерием устойчивости термодинамических систем является выполнение условия

$$\delta_x \sigma = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\delta^2 S}{2} \right) \geq 0,$$

где $\delta_x \sigma$ – избыток продукции энтропии вследствие флуктуации;
 δS – отклонение энтропии от равновесного значения флуктуаций;
 S – энтропия.

Сущность этого критерия в следующем: производная по времени отклонения энтропии от равновесного состояния таких систем должна быть положительной. Таким образом, *рост диссипации энергии со временем обеспечивает устойчивость сильноравновесных систем* и сами системы становятся все более упорядоченными. Отсюда видно, что необратимое разрушение системы (или эволюционное изменение структуры) начинается тогда, когда нарушается условие флуктуационной устойчивости. Именно такие явления характерны для открытых систем типа угольного пласта, в которых происходят нелинейные необратимые процессы и разрушение материала (изменение структуры).

Используя концепции термодинамики необратимых процессов и приведенную флуктуационно-диссипативную теорему, изложим основные положения механизма образования опасных зон газодинамических явлений в системе уголь–метан–влага.

В этом случае систему можно представить как открытую, поддерживаемую за счет потока внешней энергии (горное давление, давление газа) в термодинамически квазиравновесном состоянии. Изменяя внешний поток (например, горное давление), можно направлять эволюцию системы к состоянию, все более отличному от равновесного. При некотором критическом значении концентрации поврежденности произойдет переход системы в неустойчивое состояние. Этому положению в горном массиве соответствует переход от рассеянного разрушения к глобальному, характеризуемый появлением магистральной трещины.

В целом кинетику разрушения системы уголь–газ–влага, начиная от зарождения микротрещин до появления магистральных макротрещин, представим следующим образом. Горное давление в сочетании с метаногенерацией способствует развитию в угольном массиве ансамбля различного вида микрповреждений, концентрация которых со временем достигает некоторого критического уровня. Такая эволюция системы в дальнейшем приводит к кооперативному эффекту: за счет спонтанных

флуктуаций, всегда присутствующих в угольном массиве, происходит слияние микротрещин, зарождение магистральной трещины и переход системы в новое состояние, которое можно назвать квазиупорядоченным.

Именно переход от рассеянного разрушения системы к глобальному можно в некотором смысле считать «квазифазовым», а саму магистральную трещину – новым структурным образованием системы. С определенными допущениями полагаем, что система переходит в некоторое состояние, более упорядоченное, чем предыдущее.

Согласно критерию устойчивости Гленсдорфа–Пригожина для неравновесного состояния системы производная по времени от отклонения энтропии должна быть положительной. В этом случае устойчивость такой неравновесной системы обеспечивается *ростом диссипации со временем*.

Под действием внешних сил, благодаря автоталитическому механизму зарождения и развития повреждений (разного размера микротрещины, поры и т. д.), диссипативная система уголь–газ через ряд последовательных бифуркационных процессов эволюционирует к новому равновесному состоянию; при некоторой критической концентрации поврежденности переходит от рассеянного разрушения к глобальному, в результате чего появляется магистральная трещина как гигантская флуктуация. Магистральная трещина может также появиться вследствие тектонических нарушений, землетрясений и т. д.

Устойчивость такого нового образования обеспечивается ростом во времени диссипации энергии. Именно диссипация энергии способствует остановке развития трещин, изменению в определенных локальных объемах структуры угля и образованию зон, которые при определенных условиях можно назвать опасными по внезапным выбросам угля и газа. Геометрические размеры этих зон диктуются собственно размерами фронта магистральных трещин, структурой системы уголь–газ–влага и внешним силовым полем.

Указанные «спящие» зоны как очаги опасности могут существовать в нетронutom угольном массиве довольно длительное время: их эволюция будет определяться изменением горного давления, скоростью метаногенераций, тектоническими нарушениями угольного пласта и т. д. Находясь под действием внешних силовых полей, их квазиравновесное состояние будет изменяться во времени, однако *энтропия – согласно второму началу термодинамики – неизменно возрастает*.

Для обеспечения устойчивого состояния все процессы в очаге опасности на определенном промежутке времени будут проходить (эффект самоорганизации) с потреблением минимума энергии (закон Рэля–Гельмгольца) и с производством минимума энтропии (закон Пригожина); изменение внешних условий может нарушить такое равновесие и тогда в зоне изменится параметр порядка. В реальных условиях это приведет прежде всего к изменению структуры вещества зоны: появлению новых микротрещин, изменению скорости метаногенерации, появлению мелких фракций угля и т. д. Поэтому в очагах опасности уголь будет всегда в «помятом» состоянии с наличием мелких фракций и метана в свободном состоянии, что и подтверждается практикой. Более подробно этот материал изложен в статье [2].

Геологическая модель образования очагов опасности (зон ГДЯ). В угольном пласте в течение геологического времени вследствие многократно повторяющихся тектонических и геохимических процессов сформировались зоны с аномальными физико-механическими и механохимическими свойствами на всех уровнях структурной организации вещества. Этому способствовали: пространственно неоднородные поля напряжений и температур, метаногенерация, механохимические эффекты и т. д. Такие аномальные зоны образовались при движении и остановках магистральных трещин и обусловлены эффектами локальности и дискретности; под действием горного давления и метаногенерации в них изменяется структура угля, что приводит к повышению диссипации энергии системы уголь–метан и температуры. Такую природную зону (очаг опасности) можно рассматривать как квазизамкнутую (квазиконсервативную) термодинамическую систему, находящуюся на некотором промежутке времени в квазиравновесном состоянии. Тектонические процессы, землетрясения и другие природные явления могут изменять структуру угля и скорость выведения метана; однако вследствие замкнутости системы и наличия горного давления зона сохранит свои параметры, превращаясь в «спящую опасность».

С учетом практического опыта и результатов экспериментальных исследований можно утверждать:

- очаги опасности возникли в геологическое время (т. е. миллионы лет назад), однако под действием тектонических напряжений могут образовываться и в историческое время. В большинстве случаев они связаны с зонами геологической нару-

шенности (тектонические разрывы, трещины и т. д.); тектонические трещины в горных породах распространяются веером, отсюда: малые трещины – малые очаги, большие разломы – большие очаги;

- горное давление может сомкнуть трещину, но очаг опасности вследствие давления газа (наверное, в том числе и дополнительного за счет метаногенерации) останется;

- в случае природных катаклизмов под действием силовых полей разной интенсивности в условиях объемного сжатия пласта скорость метаногенерации увеличится, что наряду с другими механохимическими эффектами повысит диссипацию энергии и температуру; «накачка» энергии в пласт приведет к дроблению угля и появлению тонкодисперсных фракций;

- с увеличением глубины шахт количество очагов опасности, как правило, возрастает, природа их образования примерно одинакова; однако механизм газодинамических явлений и внешние их проявления разные (удар, внезапный выброс угля и газа, высыпание угля, выделение газа и т. д.);

- в очагах опасности температура всегда выше и все механохимические реакции проходят быстрее;

- очаги опасности различных интенсивности и геометрических размеров существуют как бы «сами по себе», резко отличаясь по своим свойствам от нетронутого угольного массива, а проявляются в большинстве случаев при техногенной деятельности человека, часть из них – также от природных катаклизмов;

- тектонические трещины могут возникать и в горном массиве; при достижении ими угольного пласта как диссипативной среды включается механизм взаимосвязи диссипация–температура, благодаря чему образуются зоны с сильно измененной структурой, которые впоследствии при благоприятных условиях могут превратиться в зоны ГДЯ;

- очаги опасности возникают и при техногенной деятельности, однако отличаются от природных структурой угля, метаногенерацией и геометрическими размерами.

Кластерно-синергетическая нелинейная эволюционно-структурная модель газодинамических явлений в угольном массиве. Обобщая полученную экспериментальную информацию, выделим ее основные положения. В угольном массиве очаги опасности ГДЯ образуются в основном в геологическое время под влиянием тектонических и геохимических процессов: возможно образование их и в историческое время. Эволюция системы уголь-газ-влага отличается локальностью и дискретно-

стью. В вершине движущейся трещины локальный разогрев может достигать частичной термодеструкции вещества, что будет способствовать интенсивной метаногенерации и дроблению угля вплоть до образования наночастиц.

Микротрещины в угле способны диссипировать, т. е. рассеивать энергию, которая уменьшает напряжения в устьях трещин и приостанавливает их рост. Сформировавшиеся при этом зоны с измененной структурой вещества могут объединяться, образуя гигантскую флуктуацию (магистральную трещину), остановка которой предполагает образование очага опасности.

В очагах опасности по сравнению с нетронутым массивом всегда будут более высокая температура, давление свободного газа, повышенное производство энтропии и все химические реакции будут проходить более ускоренно.

Принимая эти положения, модель газодинамических явлений можно представить в следующем виде.

В системе уголь–газ–влага в процессе эволюции очага опасности под действием горного давления и давления газа концентрация микротрещин возрастает вплоть до состояния, когда они начинают сливаться и локально образуют зоны с существенно измененной структурой вещества. Такие зоны некоторое время находятся в квазиравновесном состоянии, а колебания их основных параметров (напряжение, давление газа, скорость метаногенерации и т. д.) не выходят за допускаемые пределы.

При достижении основными параметрами некоторых критических значений под действием малых возмущений техногенного или природного характера квазиравновесное состояние нелинейной неравновесной системы может быть нарушено. Это выражается в росте древовидного ансамбля трещин и аномальной метаногенерации из движущихся трещин; диссипация энергии резко возрастает, что повышает температуру и диссипацию энергии (рис. 2). Такое взаимодействие между температурой и диссипацией приводит к резкому нелинейному увеличению температуры; процесс из метастабильного превращается в лабильный, что приводит систему к тепловому взрыву. При этом сохраняется принцип температурно-временной суперпозиции.

Критериями теплового взрыва будут критерии подобия, известные как критерии Семенова или Франк–Каменецкого [11].

Если теплообмен в системе идет быстрее, чем теплообмен с окружающим пространством (например, с угольным массивом), используется критерий

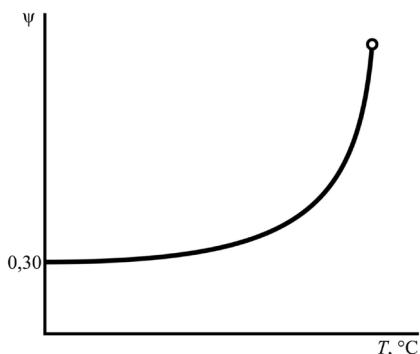


Рис. 2. Зависимость диссипации энергии ψ от температуры T .

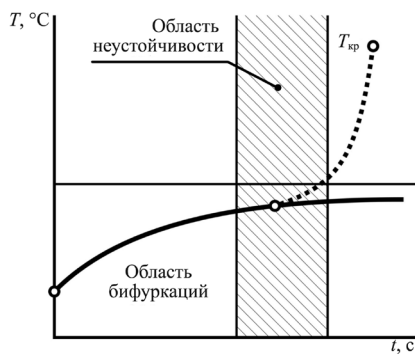


Рис. 3. Зависимость $T(t)$.

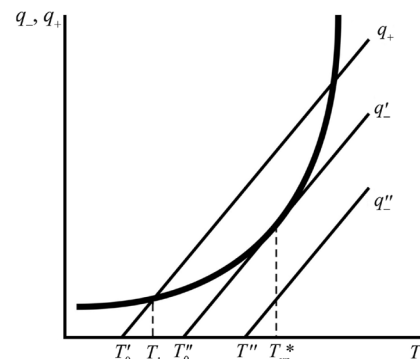


Рис. 4. Диаграмма Н. Н. Семенова.

Н. Н. Семенова – так называемая нестационарная теория теплового взрыва; условия «взрыва» определяются как условия прогрессивного увеличения разогрева системы, т. е. повышения температуры с увеличением времени реакции (рис. 3):

$$S_e = \frac{Q}{\lambda(S/V)} \frac{E}{RT_0^2} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

где Q – тепловой эффект реакции;
 λ – коэффициент теплопроводности вещества;
 S – поверхность теплоотдачи;
 V – объем реагирующего вещества;
 E – энергия активации;
 R – газовая постоянная;
 T_0 – температура окружающей среды;
 k_0 – предэкспоненциальный фактор.

Если теплообмен с окружающим пространством осуществляется быстрее, чем внутри реагирующей системы, используется критерий Франк-Каменецкого, выражающий соотношение между масштабами теплоприхода и теплоотвода (стационарная теория теплового взрыва).

Для газодинамических явлений в угольном массиве более подходит нестационарная теория теплового взрыва Н. Н. Семенова, так как скорость протекания реакции (5 – 30 с) такова, что теплообмен внутри зоны ГДЯ будет идти намного быстрее, чем теплообмен с окружающим угольным массивом вследствие низкой теплопроводности окружающей среды. Рассмотрим ее более подробно.

В предположении, что температура в реакционном объеме распределена равномерно, скорость тепловыделения описывается формулой

$$q_+ = Qk_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

а скорость теплоотвода –

$$q_- = (\alpha S/V)(T - T_0).$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Соотношение между количеством накапливающейся в системе теплоты и температурой обычно представляют в виде диаграммы Н. Н. Семенова (рис. 4).

Если условия теплообмена между системой (в рассматриваемом случае между очагом ГДЯ) и средой таковы, что температура окружающей среды T_0 и линия q'_- пересекают линию q_+ , в системе устанавливается постоянная температура T_1 и тепловой взрыв не происходит. Если при любой температуре (этот вывод очень важен) теплоотвод меньше тепловыделения (прямая q''_- , $T_0 = T''$), происходит тепловой взрыв. Критическое условие определяется касанием линий и выражается критерием Н. Н. Семенова.

Замечания к модели. Тепловой взрыв очага опасности ГДЯ как экзотермическая реакция первого порядка становится возможным при случайном совпадении ряда факторов: наличия горного давления, давления газа в свободном состоянии, высокой скорости метаногенерации, тонкой перемычки (пробки) между зоной и окружающей средой, критической температуры в зоне (она неизвестна) и внешних возмущений природного или техногенного характера.

По существу ГДЯ может произойти исключительно при сочетании аномального газовыделения (а это возможно лишь при движении ансамбля различного рода микротрещин) и внешнего силового поля; горное давление, как показала практика, может быть незначительным; отсюда весьма интересный вывод: *в механизме ГДЯ доминирующую роль играет метаногенерация.*

Зона ГДЯ устойчива благодаря горному давлению и достаточно «большой перемычке»; при недостаточной перемычке возможен тепловой взрыв различной интенсивности (или просто высыпание угля с газовойделением). ГДЯ может произойти и при остановке работ из-за природных воздействий и релаксации пласта.

Геометрические размеры зоны ГДЯ (полости) образуются в процессе теплового взрыва и связаны с двумя основными эффектами: первый – в зоне практически отсутствует кислород, поскольку его не пропускает метан, находящийся под давлением, что исключает самовозгорание газа; второй – при тепловом взрыве в зоне резко возрастают давление и температура, благодаря чему во время взрыва тонкодисперсные частицы угля забивают микротрещины образовавшегося объема полости, препятствуя тем самым проникновению метана из окружающего угольного массива; грушевидная форма полости объясняется наличием объемного древовидного ансамбля микротрещин.

Среди информационных параметров, характеризующих ГДЯ, особенно следует выделить температуру, так как она характерна для всех экзотермических реакций. При этом благодаря низкой теплопроводности угля именно в больших зонах опасности (даже несмотря на их квазиустойчивое состояние) будет развиваться аномально высокая температура. В отличие от температуры акустическую эмиссию более сложно идентифицировать. В равной степени (по значению сигнала) она присуща малым трещинам и зонам ГДЯ разных размеров.

Из модели следует вывод: скорость проходки не играет существенной роли вплоть до «критического» приближения к очагу опасности; естественно, следует учитывать «незначительные» очаги: за одну смену возможно несколько выбросов угля и газа малой интенсивности.

Механизм газодинамических явлений удобно моделировать с помощью теории катастроф (ГДЯ – типичная катастрофа типа сборки). Газодинамическое явление можно моделировать как нерегулярное поведение нелинейной системы, непосредственно связанной с детерминированным многомерным хаосом; в этих случаях довольно трудно использовать математический аппарат, так как в зоне во время теплового взрыва будет переходной процесс с мощными турбулентными потоками. Математическое описание такого процесса проблематично.

Некоторые важные предпосылки к дальнейшим исследованиям. Эти предпосылки весьма необходимы в связи со сложностью процессов, проте-

кающих в зонах ГДЯ и неизученностью химических реакций.

Температура в очаге опасности ГДЯ. При объемном сжатии образцов угля О. Н. Малинникова [6] получила превышение температуры $\Delta T \geq 3^\circ\text{C}$ и объяснила это дополнительной сорбцией метана в процессе разрушения угля. Результаты эксперимента не вызывают сомнения, однако объяснения недостаточно исчерпывающие, так как наряду с возможным повышением температуры от сорбции метана следует учитывать и экзотермические эффекты в устьях движущихся трещин. Несмотря на то что микрообъемы и длительность импульсов несущественны (доли мм^2 , микросекунды), суммарный температурный эффект от движущегося ансамбля микротрещин может быть значителен.

Принципы температурно-временной суперпозиции. Для упругонаследственных сред характерна совместимость с принципом эквивалентности скорости и температуры, т. е. некоторая величина $A(V, T)$, зависящая от скорости и температуры протекания реакции, подчиняется температурно-временной суперпозиции (так называемое уравнение ВЛФ: Вильямса – Ландела – Ферри [1]). Применительно к рассматриваемой системе уголь–метан–влага можно считать, что повышение температуры в очаге опасности ГДЯ, предположим на 100°C , адекватно уменьшает время теплового взрыва на несколько секунд. Это в какой-то мере объясняет различную продолжительность выбросов угля и газа (5 – 30 с). При этом не следует исключать и влияние других факторов: давления газа, горного давления, структуры угля и т. д.

По-видимому, следует согласиться с тем, что в зоне ГДЯ (т. е. непосредственно в полости) в момент теплового взрыва (возможно на короткое время) температура в локальных объемах достигает $600 - 800^\circ\text{C}$; об этом свидетельствуют показания специалистов-горняков, однако экспериментальные или документальные доказательства неизвестны.

Критическая температура в зоне ГДЯ. Это температура, при которой начинается спонтанный переход системы из метастабильного состояния в лабильное. Ее значение для конкретных условий неизвестно (пределы примерно $600 - 800^\circ\text{C}$). По мнению Н. Н. Семенова [11], оно может быть любым.

Трещиноватость угля. Экспериментально установлено (ИГТМ НАНУ), что угли, извлеченные из зоны выброса, обладают повышенной трещиноватостью: на 1 мм^2 находится примерно 1000 субмикротрещин; в 1 мм^3 их более миллиона. При объ-

емном сжатии благодаря экзотермическим эффектам в устьях трещин, сорбции газа, электрическим полям и эмиссии электронов вполне возможно появление в локальных областях зоны как аномально высокой температуры, так и зоны высокой метано-генерации.

Роль воды. При исследовании ГДЯ большинство ученых рассматривают систему уголь–газ–влага, отмечая при этом важную роль воды; однако серьезные работы в этой области отсутствуют, роль воды до настоящего времени ни на теоретическом, ни на экспериментальном уровне не определена; в работе [14] отмечается, что «...количество выделившейся воды при диссоциации соответствующих объемов гидрата метана зачастую должно быть равно, а порой даже и превышать объемы выброшенного угля». Однако, и это отмечают авторы, практика не подтверждает такую гипотезу, а «...влажность угля, выброшенного внезапным выбросом в горную выработку, никогда не превышала влажность угля в нарушенной части пласта».

Пласт не является «мертвым»; во времени он эволюционирует. Скорость эволюции (т. е. изменения структуры во времени) определяется прежде всего горным давлением. Энтропия (т. е. мера беспорядка) возрастает, растет диссипация энергии как основной источник устойчивости системы.

Образование полости в зоне ГДЯ. В процессе эволюции зона ГДЯ не имеет четких границ, контуры ее размыты. Конечные геометрические размеры полости формируются в момент теплового взрыва, когда «бешеная мука» запечатывает микротрещины полости, частично не пропуская кислород из пласта и создавая предельные размеры грушевидной емкости. По мнению авторов работы [3], этому способствует древовидный ансамбль трещин. Если же таких ансамблей будет несколько, то полость может приобретать причудливую форму [4].

Геометрические размеры полостей выбросов угля и газа не случайны, так как в основе их образования лежат термодинамические принципы и в том числе явление детерминированного хаоса. По мнению Д. И. Трубецкого [13], возникновение детерминированного хаоса в сложных динамических системах состоит в следующем. Если в фазовое пространство поместить динамическую систему, то ее роль состоит в превращении случайности начальных условий в макроскопическую случайность движения системы. При существовании в системе локальной неустойчивости, когда близкие траектории расходятся экспоненциально, это движение определяется начальными условиями.

Следует подчеркнуть, что образом хаоса в фазовом пространстве является странный аттрактор; в хаосе есть некоторый порядок и всегда существуют универсальные сценарии возникновения хаоса. Один из сценариев перехода к хаосу через бесконечный каскад бифуркаций удвоения периода принадлежит Фейхенбауму (в науке о турбулентности известна его постоянная $\delta = 4,6692$). Известно также [1] использование для этой цели принципа «золотой пропорции», равно как и чисел Фибоначчи.

Даже беглое рассмотрение этого вопроса свидетельствует о том, что соотношение длины и ширины полости выброса подчиняется, с некоторыми допущениями, принципу «золотой пропорции». Однако такое утверждение требует доказательства.

В принципе, образование полости выброса зависит от многих факторов, в том числе и внешнего силового воздействия. Однако в целом этот процесс, несмотря на вероятностную природу проявления всех термодинамических параметров, подчиняется критерию Гленсдорфа – Пригожина (производство минимума энтропии) и Гельмгольца – Ньютона (из всех сценариев осуществляются только те, которые потребляют минимум энергии).

Отметим, что зоны ГДЯ образуются спонтанно, контуры их размыты, поскольку процесс их образования растянут во времени и влияние самых разных факторов, в том числе и таких, как тектонические землетрясения, проявляется в полной мере. Однако образование полостей во время выброса будет подчиняться термодинамическим принципам, и, безусловно, геометрические размеры полости должны согласовываться с некоторыми универсальными постоянными.

Выводы. Сформулирована термодинамическая модель, объясняющая механизм образования и эволюции очагов опасности ГДЯ. Установлена особая роль взаимосвязи диссипации энергии и температуры в угольном массиве как в упругонаследственной среде, находящейся под действием объемного сжатия. Именно эта взаимосвязь приводит к образованию объемов с измененной структурой угля; объемы могут иметь различные размеры: от микро-объемов до гигантских флуктуаций (5 – 10 м) и больше.

Определен механизм образования очагов опасности ГДЯ как флуктуаций различного размера, возникающих при движении трещин; в основе механизма – взаимосвязь диссипации и температуры, а также локальность и дискретность механизма разрушения угля.

Выявлена особая роль температуры в локальном объеме угольного массива, вызванная экзотермическими эффектами в устьях движущихся микротрещин. Эти эффекты (возможно в сочетании с сорбцией метана) объясняют и высокую температуру в зонах ГДЯ, и кратковременное появление зон с аномально высокой температурой. По мнению специалистов, в угольном массиве на короткое время могут возникать зоны с высокой температурой (уголь приобретает красный цвет); также отмечается, что при выбросе наблюдались зоны угля красного цвета.

Сформулирована кластерно-синергетическая нелинейная модель газодинамических явлений в угольном массиве; в основе механизма проявления ГДЯ, лежит экзотермическая реакция теплового взрыва; его критерием служит критерий Н. Н. Семенова, а спусковым механизмом – малые внешние возмущения техногенного или природного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прикладная механика упругонаследственных сред*: В 3-х т. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, Е. Л. Звягильский, А. С. Кобец. – К.: Наук. думка, 2011. – 568 с.
2. Булат А. Ф. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А. Ф. Булат, В. И. Дырда // *Геотехническая механика*. – 2013. – Вып. 108. – С. 3 – 31.
3. *Метаногенерация в угольных пластах* / А. Ф. Булат, С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, В. А. Анциферов. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. – 328 с.
4. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / А. Д. Алексеев. – К.: Наук. думка, 2010. – 423 с.
5. *Прогнозирование неустойчивости системы уголь–газ* / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, В. Н. Чистоклетов. – Донецк: Ноулидж (донецк. отд.-е), 2010. – 344 с.
6. *Малинникова О. Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты*: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 25.00.20 / УРАН ИПКОН РАН. – М., 2011. – 47 с.
7. *Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр* / К. Н. Трубецкой, С. Д. Викторюк, Ю. П. Галченко, В. Н. Одинцев // *Вестник РАН*. – 2006. – Т. 76. – № 4. – С. 318 – 332.
8. Грицко Г. Внезапные выбросы метана в шахтах / Г. Грицко // *Наука в Сибири*. Еженедельная газета СО РАН. – 2007. – № 32 – 33 (2617–2618) от 23.08.07. – 6 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sbras.ru/HBC/article.phtml>. – Загл. с экрана.
9. *О целесообразности использования некоторых показателей выбросоопасности* / Б. В. Бокий, П. Е. Филимонов, С. Г. Ирисов // *Уголь Украины*. – 2011. – № 11. – С. 25 – 29.
10. Зборщик М. П. Тектонофизическая природа газодинамических явлений при разработке пологих пластов / М. П. Зборщик, В. И. Пилюгин // *Уголь Украины*. – 2010. – № 11. – С. 8 – 11.
11. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н. Н. Семенов // *Успехи физических наук*. – 1940. – Т. XXIII. – Вып. 3. – С. 251 – 292.
12. *Отчет о деятельности научного совета РАН и краткие результаты научно-исследовательских работ учреждений и организаций горного профиля РФ и стран СНГ в 2011 г.* – М., 2012. – 304 с.
13. Трубецков Д. И. Турбулентность и деформированный хаос / Д. И. Трубецков // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – № 1. – С. 77 – 86.
14. Опарин В. Н. О механизме зарождения процессов, завершающихся внезапными выбросами угля и газа / В. Н. Опарин, В. А. Скрицкий // *Горная промышленность*. – 2012. – № 5. – С. 56 – 58.

А. Ф. Булат, В. І. Дирда

Раптові викиди вугілля і газу в контексті нелінійної нерівноважної термодинаміки

На основі сучасних концепцій нелінійної нерівноважної термодинаміки сформульовано модель газодинамічних явищ у вугільному масиві. У системі вугілля – газ – волога розглянуто еволюцію осередку небезпеки. Наведено критерії теплового вибуху, так званій критерій Семенова, а також розглянуто роль температури та аномальну метаногенерацію.

A. Bulat, V. Dirda

Sudden coal and gas outburst in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics

The model of gas-dynamic phenomena in coal massif is formulated on the basis of modern concepts of nonlinear nonequilibrium thermodynamics. Peril focus evolution is considered in coal – gas – humidity system. Criteria of thermal exposure are considered, the so-called Semenov criterion and the role of temperature and anomalous methane generation are given.