

УДК 622.831.323

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.003>

## НЕЛИНЕЙНАЯ ЭВОЛЮЦИОННО-СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНОМ МАССИВЕ

<sup>1</sup>Булат А.Ф., <sup>1</sup>Дырда В.И.<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

## НЕЛІНІЙНА ЕВОЛЮЦІЙНО-СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ВУГІЛЬНОМУ МАСИВІ

<sup>1</sup>Булат А.Ф., <sup>1</sup>Дурда В.І.<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

## NONLINEAR EVOLUTION-STRUCTURAL MODEL OF GAS-DYNAMIC PHENOMENA IN A COAL MASSIF

<sup>1</sup>Bulat A.F., <sup>1</sup>Dyrda V.I.<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

**Аннотация.** На основе обширной экспериментальной информации была построена кластерно-синергетическая эволюционно-структурная модель газодинамических явлений (ГДЯ) в угольном массиве. Её основу составили следующие 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 дискретностью. 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 изменённой 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 изменённой 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. 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.

На основе современных концепций нелинейной неравновесной термодинамики сформулированы важные замечания к модели газодинамических явлений в угольном массиве. Показано, что в зоне выброса в период коллапса определённые части зоны (ядра) обладают различной скоростью эволюции структуры и газовыделения. По мнению авторов в процессе эволюции зоны выброса возникает асимметрия основных информационных параметров (давления, скорости метаногенерации и т.д.), что может привести к образованию малых возмущений, которые могут ингибировать процесс, обычно приводящий к тепловому взрыву. Таким образом, наряду с внешними возмущениями природного и техногенного характера малая асимметрия внутренних параметров ядер может также стать причиной запуска процесса теплового взрыва.

**Ключевые слова:** имитационная модель, газодинамические явления, угольный массив, коллапс, тепловой взрыв, выбросы угля и газа, динамические явления

## Введение

Обзор публикаций по проблеме ГДЯ в угольном массиве изложен в работах [1-5]. Основные выводы из обзора изложим в виде кратких обобщений.

1. Проблема ГДЯ возникла более 100 лет тому, однако её актуальность не уменьшается особенно в связи с добычей угля на больших глубинах.

2. С ростом глубины шахт механизм ГДЯ изменяется, изменяется также механизм разрушения угля и газовыделения – эти факторы пока недостаточно учитываются.

3. Результаты ряда исследований (особенно по горному давлению, температуре, давлению газа и т.д.) не обладают достаточной полнотой, а в ряде случаев носят противоречивый характер.

4. К результатам исследований на образцах следует относиться очень осторожно, особенно при изучении газовыделения т.к. экспериментальные образцы не отражают структуру угольного пласта; метан в реальном пласте образовался в процессе метаморфизма органического материала пласта, т.е. в уголь он проникал изнутри в течение геологического времени.

5. Динамические и газодинамические явления отличаются большим разнообразием и временным фактором возникновения (геологическое и историческое время) и поэтому вряд ли для их описания можно использовать универсальные модели.

6. В последние годы в рассматриваемой области количество монографий возросло, однако обобщения носят фрагментарный характер и не обладают полнотой. К тому же выводы зачастую противоречивы и лишь подчёркивают индивидуальность научной школы: нет обобщающих физических моделей, всегда акцентация на одном механизме ГДЯ – либо подробно рассматривается горное давление, либо газовыделения. Работ же, где эти механизмы рассматривались бы как единое целое, практически нет.

7. Необходимо признать сложность проблемы возникновения и эволюции ГДЯ как с точки зрения построения адекватных физических и математических моделей, так и с точки зрения разработки технологий безопасной добычи угля. Многие физические явления в угольном массиве не укладываются в рамки современной горной науки. Поэтому на современном этапе изучения таких грозных природно-техногенных явлений, как ГДЯ, необходимо «... понять постижимое и спокойно принять непостижимое» (Гёте).

### **1 Кластерно-синергетическая нелинейная эволюционно-структурная модель газодинамических явлений в угольном массиве**

Прежде чем перейти непосредственно к модели, рассмотрим её основные составляющие.

#### ***1.1 Обобщённая феноменологическая модель угольного массива***

Природная газонасыщенная система «уголь-газ-влага» рассматривается как:

- осадочная порода, в состав которой входят органические и неорганические вещества;

- блочная геосфера, наделённая иерархией структурных уровней вплоть до наночастиц; композит, обладающий нелинейными свойствами;
- трещинно-пористая гетерогенная многофазная среда, насыщенная метаном (метан в угольном массиве накапливался за геологические периоды времени);
- упруговязкопластическое твёрдое тело;
- нелинейная существенно диссипативная анизотропная среда;
- сложное полидисперсное микропористое образование, динамические характеристики которого могут существенно изменяться под воздействием давления и температуры;
- упруго-наследственная структурно-эволюционная среда, параметры которой изменяются со временем существования.

### ***1.2 Понятия «пространство-время» для ГДЯ***

Нетронутый угольный пласт и очаги опасности существуют в геологическом времени: техногенная деятельность человека переводит их в историческое время, изменяя тем самым пространственно-временной континуум. Деятельность человека носит локальный характер, реакция пласта и очагов опасности также носит локальный характер. Все это позволяет для построения физических и математических моделей использовать классические теории (теорию упругости, МТДТ, термодинамику и т.д.), рассматривая поведение пласта и зон опасности в реальном времени.

### ***1.3 Геологическая модель образования очагов опасности (зон ГДЯ)***

В угольном пласте в течение геологического времени вследствие многократно повторяющихся тектонических и геохимических процессов сформировались области с аномальными физико-механическими и механохимическими свойствами на всех уровнях структурной организации вещества. Их образованию способствовали: пространственно неоднородные поля напряжений и температур, метаногенерация, механохимические эффекты и т.д. Такие аномальные области образовались при движении и остановках магистральных трещин и обусловлены эффектами локальности и дискретности; в этих областях под действием горного давления и метаногенерации происходит изменение структуры угля, что приводит к повышению диссипации энергии системы «уголь-метан» и неизбежному повышению температуры. Такая природная область (зона, очаг опасности) может рассматриваться как квазизамкнутая (квазиконсервативная) термодинамическая система, находящаяся на некотором промежутке времени в квазиравновесном состоянии. Тектонические процессы, землетрясения и другие природные факторы 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 учётом накопленного практического опыта и результатов экспериментальных исследований можно утверждать следующее:

- очаги опасности в большинстве случаев связаны с зонами геологической нарушенности (тектонические разрывы, трещины и т.д.); тектонические трещины в горных породах распространяются веером, отсюда наличие очагов опасности

различного размера: малые трещины – малые очаги, большие разломы – большие очаги опасности;

- очаги опасности возникли в геологическое время (т.е. млн. лет); однако под действием тектонических напряжений могут образовываться и в историческое время;
- горное давление может сомкнуть трещину, но очаг опасности благодаря давлению газа (наверное, в том числе и дополнительного за счёт метаногенерации) останется;
- в случае природных катаклизмов под действием силовых полей различной интенсивности в условиях объёмного сжатия пласта скорость метаногенерации увеличится, что приводит наряду с другими механохимическими эффектами к повышению диссипации энергии и температуры; накачка энергии в пласт приведёт к дроблению угля и появлению тонкодисперсных фракций;
- с увеличением глубины шахт количество очагов опасности может возрастать, природа их образования примерно одинакова; однако механизм газодинамических явлений и внешние их проявления могут быть разными (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 различной интенсивности и различных геометрических размеров существуют как бы «сами по себе», резко отличаясь по своим свойствам от нетронутого угольного массива; проявляются они в большинстве случаев при техногенной деятельности человека; часть из них проявляется также от природных катаклизмов;
- тектонические трещины могут возникать и в горном массиве; при достижении угольного пласта как диссипативной среды включается механизм взаимосвязи «диссипация-температура», благодаря чему образуются зоны с сильно изменённой структурой, которые впоследствии при благоприятных условиях могут превратиться в зоны ГДЯ;
- очаги опасности могут возникать и при техногенной деятельности; однако они будут отличаться от природных структурой угля, метаногенерацией и геометрическими размерами.

#### ***1.4 Термодинамическая модель образования и разрушения (эволюции) зон ГДЯ***

Как известно, физической причиной разрушения твёрдых тел является флуктуация внутренних термодинамических параметров. В этой связи становится очевидным, что разрушение как процесс возникает в неравновесной области состояний и носит эволюционный характер. Для построения термодинамической модели длительного разрушения (эволюции системы) зон ГДЯ воспользуемся положениями термодинамики необратимых нелинейных процессов.

Онзагером было показано, что в области линейно неравновесных процессов имеет место вариационный принцип нелинейного рассеяния энергии (максимальной диссипации). Пригожин установил, что стационарные процессы характеризуются минимумом возникновения энтропии. В разное время Циглером и

Дьярматти были предложены новые формулировки принципа минимального рассеяния энергии. Кроме того, было показано, что в отличие от принципа Онзагера принцип Пригожина справедлив только для стационарных процессов и в этом случае эквивалентен принципу наименьшего рассеяния энергии. Таким образом, наиболее общим вариационным принципом термодинамики необратимых процессов является принцип наименьшего рассеяния энергии.

Принцип Онзагера как наиболее общий для неравновесных процессов в приложении к разрушению ГДЯ можно сформулировать следующим образом: процесс разрушения протекает таким образом, что система стремится минимально диссипировать энергию внешнего воздействия.

Принцип минимума производства энтропии позволяет сформулировать критерий эволюции, означающий, что система будет эволюционировать к стационарному неравновесному состоянию. Полная эволюция при этом укладывается в термодинамический принцип и выражается соотношением

$$\int (d\sigma/dt) dV \leq 0.$$

При этом следует учитывать, что линейная область является экстраполяцией равновесного режима и в ней наблюдается флуктуационная устойчивость системы.

Ситуация качественно изменяется при переходе системы в область нелинейных неравновесных процессов, т.е. в область сильнонеравновесной термодинамики. В этой области уже не существует такой общей функции Ляпунова, какой являлось производство энтропии для линейных процессов. Более того, за счёт внешних источников может происходить усиление флуктуации термодинамических величин, и тогда исчерпывающее описание системы невозможно провести без привлечения макроскопических величин.

Как показал Пригожин, критерием флуктуационной 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;

$\delta S$  ( $S$  – энтропия) – отклонение энтропии от равновесного значения флуктуаций.

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 сильнонеравновесных 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 имеют место для открытых систем, в которых идут нелинейные необратимые процессы и разрушение материала (изменение структуры).

Таким образом, разрушение является одним из проявлений флуктуационной неустойчивости внутренних термодинамических параметров системы в

нелинейно неравновесных процессах, каковыми являются достаточно интенсивные условия нагружения (в рассматриваемом случае горное давление).

Очевидно, что нелинейность процесса разрушения обусловлена взаимосвязью роста повреждений с общим уровнем повреждённости, т.е. в основе термодинамики разрушения лежит автокаталитический механизм.

Изложенная выше флуктуационно-диссипативная теорема устанавливает также связь между уровнем флуктуации в термодинамической системе и диссипацией энергии.

Следовательно, разрушение является сильнонеравновесным термодинамическим процессом автокаталитического типа. В целом процесс разрушения как эволюционный по своей сущности удовлетворяет двум основным требованиям: наличию автокаталитического механизма роста повреждений, что является основной сильной неравновесности процесса разрушения и эволюции материала; отсутствию периодичности автокаталитического процесса, что обеспечивает однонаправленную эволюцию материала.

Рассмотрим некоторые общие аспекты теории динамических систем с повреждённостью в контексте исследований процессов разрушения угля.

Сильнонеравновесные состояния возникают тогда, когда динамика процессов имеет нелинейный характер. Эбелинг по этому поводу отмечает, что при больших отклонениях от равновесия, описываемых нелинейными уравнениями, возможно существование нескольких стационарных решений. Исследуя их устойчивость, можно найти решение, которое имеет физический смысл, т.е. устойчиво по отношению к флуктуациям. Нестабильные состояния, напротив, характеризуются увеличением флуктуации (усилением), и система стремится перейти в новое стабильное состояние. Конечное состояние вполне может обладать более высокой степенью упорядоченности и соответственно более низкой симметрией.

В механике разрушения угля бифуркация имеет место при переходе от постепенно-кинетического этапа разрушения к лабильному разрушению, зачастую связанного с появлением магистральной трещины, причём этот переход физически обуславливается потерей устойчивости материала по отношению к определённым флуктуациям, которые, усиливаясь за счёт внешних и внутренних источников и диссипируя их энергию, являются основной причиной разрушения. Физической причиной бифуркации является действие в системе флуктуаций, устойчивость к которым теряет система, а так как флуктуации носят случайный характер, то в точке бифуркаций возрастает роль случайных факторов. Известная роль случайных дефектов в механике разрушения находит своё качественное объяснение в рамках концепции бифуркаций. Взаимосвязь случайного и закономерного для диссипативных структур отмечалась в работах Пригожина. Он указывал, что эволюция таких структур могла бы проходить через ряд неустойчивостей, возникающих вследствие флуктуаций определённых типов (стохастических элементов), с последующей детерминистической эволюцией к новому типу режима. Порядок через флуктуации в этом случае всегда подразумевает как макро-, так и микроскопические элементы. следовательно, как случай, так и закон.

Таким образом, закономерности разрушения углей носят ярко выраженный нелинейный характер. Нелинейные уравнения, как известно, имеют множество решений даже для заданных граничных внешних условий. Каждое такое решение представляет собой определённую кинетику процесса разрушения. Однако это не означает, что разрушение при заданных условиях может происходить по различным законам. Реализуется кинетика, наиболее устойчивая к флуктуационным отклонениям термодинамических величин. Устойчивой в заданных условиях нагружения будет кинетика  $X(t)$ , для которой малое отклонение  $\delta X(t)$  вызовет приращение продукции энтропии  $\delta S(t)$ , удовлетворяющее критериальному условию Пригожина.

При непрерывном изменении параметров разрушения установившаяся кинетика может потерять свою устойчивость, и тогда произойдёт скачкообразное изменение закономерности разрушения. Точки в фазовом пространстве внешних параметров разрушения, при которых происходит скачкообразное изменение кинетики, являются точками бифуркаций решений нелинейных уравнений разрушения. Физически прохождение через точки бифуркаций означает качественное изменение в согласованном поведении отдельных макроскопических систем. Усиление внешнего нагружения означает усиление скорректированности в поведении подсистем и ускорение процесса разрушения.

Известно, что в нелинейной системе ничтожные причины при известных обстоятельствах могут произвести значительное действие. По терминологии Томпсона, такое поведение называется катастрофой, или ветвлением решения (бифуркацией). Согласно Шлеглю, в таких точках время затухания флуктуаций бесконечно велико. Переход от режима, где имеется одно устойчивое стационарное состояние, к режиму, где нет устойчивых стационарных состояний, в терминологии Томпсона называется катастрофой типа сборки (рис. 1).

Элементарная катастрофа имеет следующую структуру и название элементов: поверхность отклика, пространство управления и пространство переменных состояния.

Для рассматриваемого случая механики разрушения угля к пространству переменных состояния можно отнести параметры, характеризующие изменения структуры материала, эволюционирующего во времени, т.е. повреждённость  $\Delta p$ ; к пространству управления – параметры, определяющие процессы разрушения: поле напряжений, поле температур от диссипативного разогрева и т.д.

В нашем примере можно выделить два основных случая.

1. Если пространство управления одномерно и пространство переменных состояния также одномерно, то бифуркационное множество представляет собой точку  $P$  на оси пространства управления (рис. 1, а), а  $Z$ -образная кривая имеет название кривой отклика. На кривой чётко наблюдаются зоны устойчивого и неустойчивого состояния системы, т.е. локального объёма материала.

2. Второй случай предусматривает, что пространство управления двумерно (например, напряжение  $\sigma$  и температура  $T$ ), а пространство переменных одномерно (как и в первом случае это может быть повреждённость  $\Delta p$ ). В этом случае

бифуркационное множество представляет собой сборку, а точка катастрофы – это точка сборки (рис. 1, б).

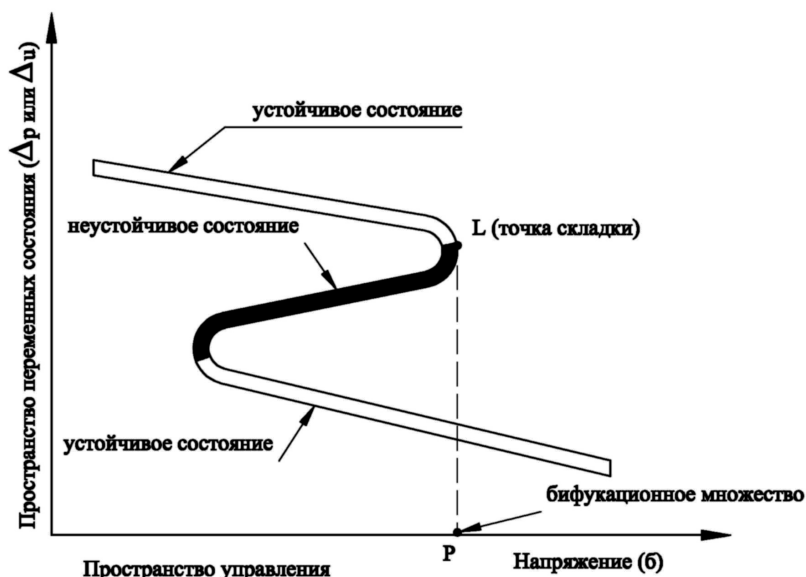
Такая модель достаточно чётко позволяет понять физический смысл и механизм разрушения локального объёма материала.

Таким образом, кинетика разрушения ГДЯ во времени может проходить через ряд последовательных бифуркаций.

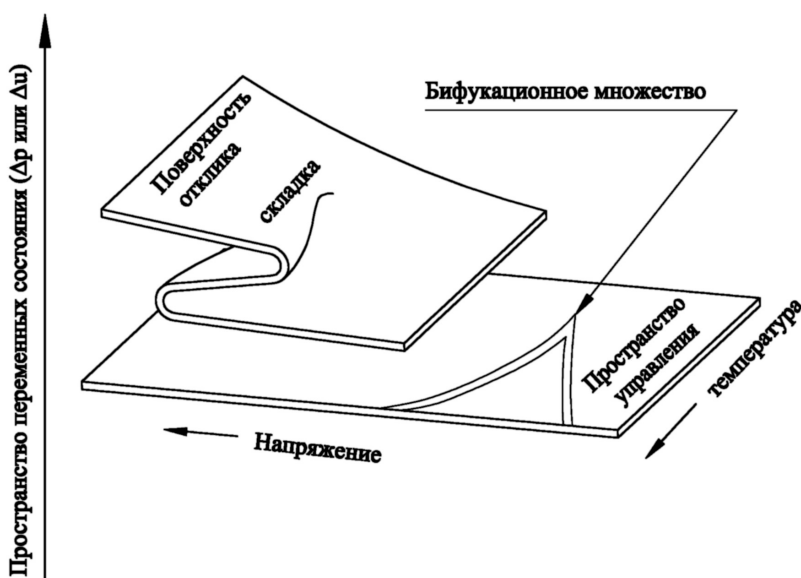
Практическим проявлением такого скачкообразного изменения кинетики является переход от постепенно-кинетического, т.е. метастабильного, характера разрушения ГДЯ к лабильному. Согласно Пригожину, для любой системы, претерпевающей бифуркации, обнаруживается единство детерминистического и случайного элементов. Между точками бифуркаций поведение системы носит детерминистический характер. В самих же точках бифуркаций существенно возрастает роль флуктуаций, причём выбор дальнейшего пути развития происходит флуктуационным, случайным образом.

Очевидно, что нелинейность процесса разрушения обусловлена взаимосвязью роста повреждений с общим уровнем повреждённости, т.е. в основе термодинамики разрушения лежит автокаталитический механизм.

Как известно, нелинейные процессы не имеют определённой кинетики, т.е. при заданных внешних условиях нагружения может реализовываться несколько кинетик. В каждый момент времени реализуется та кинетика, которая наиболее устойчива по отношению к флуктуациям внутренних параметров. При нарушении этой устойчивости происходит смена кинетик. Из практики известно, что разрушение материалов проходит, как правило, через некоторое число



а – Z-образная кривая, характеризующая потерю устойчивости локального объёма угля



б – Катастрофа типа сборки для случая разрушения локального объёма угля

Рисунок 1



эволюционных этапов, последовательно сменяющих друг друга. Условия, при которых происходит смена кинетик разрушения, получили название условий бифуркаций решений.

Используя концепции термодинамики необратимых процессов и приведённую выше флуктуационно-диссипативную теорему, изложим основные положения механизма образования опасных зон газодинамических явлений в системе «уголь-метан».

В этом случае систему можно представить как открытую систему, поддерживаемую за счёт 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 повреждённости произойдёт 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», начиная от зарождения микротрещин до появления магистральных микротрещин можно представить следующим образом.

Горное давление в сочетании с метаногенерацией способствует развитию в угольном массиве ансамбля различного вида микроповреждений, концентрация которых со временем достигает некоторого критического уровня. Такая эволюция системы в дальнейшем приводит к кооперативному эффекту: за счёт спонтанных флуктуаций, всегда присутствующих в угольном массиве, происходит слияние микротрещин, зарождение магистральной трещины и переход системы в новое состояние, которое можно назвать квазиупорядоченным.

В рассматриваемой эволюционирующей системе элемент беспорядка вносит повреждённость; «порядок» в необратимо протекающем процессе разрушения системы выражается в корреляции между флуктуациями параметров повреждённости, причём эти флуктуации распространяются на расстояния и времена, превышающие микроскопические размеры. Именно это обстоятельство и является решающим в критической области при переходе системы от рассеянного разрушения к глобальному.

Такой переход характеризуется неустойчивостью структуры: время релаксации системы на внешнее воздействие резко возрастает, флуктуации интенсивности термодинамических параметров также растут. Это означает, что в области неустойчивости флуктуации усиливаются за счёт притока энергии извне и сливаются в одну гигантскую флуктуацию, охватывающую весь объём системы. Такая флуктуация будет расти за счёт других более мелких флуктуаций до тех пор, пока не установится. Этому положению и соответствует магистральная трещина в горном массиве.

В открытой системе «уголь-метан» в неравновесном состоянии внутреннее поле создаёт корреляции во времени между определёнными событиями – макротрещинами. Другими словами, в системе под действием внешнего возмущения в области неустойчивости элементарные акты повреждённости в виде

микротрещин становятся коррелированными. Эта корреляция имеет пространственно-временную природу, и её результатом является зарождение и развитие магистральной трещины. Именно переход от рассеянного разрушения системы к глобальному можно в некотором смысле считать «квазифазовым» переходом, а саму магистральную трещину – новым структурным образованием системы. С определёнными допущениями можно полагать, что система переходит в некоторое состояние, более упорядоченное, чем предыдущее.

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

Как отмечалось выше, в области неустойчивости неравновесной системы возникает гигантская флуктуация, охватывающая весь объём системы. Именно благодаря этой флуктуации появляется параметр порядка, который в дальнейшем диктует поведение упорядоченного состояния системы после критического перехода. Разрушение как эволюционный процесс является весьма сложным, и весьма затруднительно подобрать подходящий параметр порядка, который описывал бы функциональный порядок в системе в целом. Следует лишь отметить, что рост флуктуации, по-видимому, может достигать макроскопических размеров, сравнимых с размерами части угольного пласта и что в этом процессе основную роль играет случайность, особенно при выборе новой термодинамической ветви.

Возможно, что как на микро-, так и на макроуровне процесс разрушения угля осуществляется через ряд последовательных бифуркаций. В целом процесс разрушения как «вынужденная» эволюция системы, с одной стороны, является «историческим», так как определяется предшествующей ситуацией, с другой – это недетерминированный процесс, так как может сопровождаться рядом бифуркаций. Система располагает множеством альтернативных возможностей эволюции, выбор которых непредсказуем. Выбор термодинамической ветви, по которой следует эволюция системы после бифуркации, определяется случайно в момент неустойчивости.

Рассмотрим лишь один случай неустойчивости системы – переход от рассеянного разрушения к глобальному. Это весьма важный случай в существовании системы «уголь-газ» как единого целого. Любой акт разрушения материала на микро- или макроуровне обладает общностью, осуществляется через ряд бифуркаций и подчиняется одним и тем же термодинамическим законам. Сложность проблемы не позволяет рассмотреть эти элементарные акты разрушения в их взаимосвязи, не позволяет детализировать кинетический процесс зарождения и развития повреждений и тем более получить количественные характеристики этого процесса, например, параметр порядка, критерий устойчивости и т.д.

Однако такой подход позволяет с позиций термодинамики нелинейных неравновесных систем объяснить механизм зарождения и эволюции опасных зон ГДЯ. Под действием внешних сил, благодаря автокаталитическому механизму зарождения и развития повреждений (различного размера микротрещины, поры и т.д.), диссипативная система «уголь-газ» через ряд последовательных

бифуркационных процессов эволюционирует к новому равновесному состоянию; при некоторой критической концентрации повреждённости происходит переход от рассеянного разрушения к глобальному, в результате чего появляется магистральная трещина как гигантская флуктуация. Магистральная трещина может также появиться в результате тектонических нарушений, землетрясений и т.д. В этих случаях устойчивость такого нового образования обеспечивается ростом во времени диссипации энергии. Именно диссипация энергии способствует остановке трещины (или трещин), изменению в определённых локальных объёмах структуры угля и образованию зон, которые при определённых условиях можно назвать опасными по ВВ.

Геометрические размеры этих зон диктуются собственно размерами фронта магистральных трещин, структурой системы «уголь-газ-влага» и внешним силовым полем.

Такие «спящие» зоны как очаги опасности могут существовать в нетронутом 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 будет неизменно возрастать. Для обеспечения устойчивого состояния все процессы в очаге опасности на определённом промежутке времени будут проходить (эффект самоорганизации) с потреблением минимума энергии (закон Рэлея-Гельмгольца) и с производством минимума энтропии (закон Пригожина); изменение внешних условий может нарушить такое равновесие и тогда в зоне будет изменяться параметр порядка. В реальных условиях это приведёт, прежде всего к изменению структуры вещества зоны: появления 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.

### ***1.5 Основные физические эффекты при образовании зон ГДЯ***

Природной газонасыщенной системе «уголь-метан» как твёрдому деформируемому телу присущи все свойства твёрдых тел: локальность и дискретность процесса разрушения, локальные экзотермические эффекты и механизм движения трещины в диссипативной среде. Рассмотрим их более подробно.

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

**Дискретность процесса разрушения.** Дискретность является чертой физических, химических, биологических и других процессов и проявляется в виде скачкообразно протекающих локальных элементарных процессов, периодически повторяющихся во времени. В металлах дискретность связана с исчерпыванием пластичности, которая определяется локальным напряжённым состоянием в вершине трещины. Увеличение трещины в таком случае происходит в результате критического числа единичных объёмов разрушения в зоне деформации у вершины трещины; её скачок становится возможным в момент их объединения. Этот механизм аналогичен для многих твёрдых тел, в том числе и для углей.

В устье движущейся трещины по вероятностному закону происходит слияние суб- и микродефектов и структура материала существенно изменяется в некотором локальном объёме; изменение структуры (с повышением концентрации повреждений) вызывает рост диссипации энергии, что, в свою очередь, вызывает ещё большие структурные изменения материала; температура диссипативного разогрева в локальном объёме повышается вплоть до частичной термодеструкции; трещина временно прекращает свой рост и при дальнейшем деформировании, т.е. при повышении скорости накопления упругой энергии, растёт скачкообразно. На поверхности разрушения угля это вызывает определённые фрактургические 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 её 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 трещины в её вершине образуется зона с сильно повреждённым материалом, т.е. образованием сплошности микродефектов. Диссипация этого локального объёма резко возрастает за счёт повреждаемости; температура в зоне повышается, что подтверждается экспериментально; материал частично теряет свои 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 твёрдых 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 твёрдых тел: Камбор для стеклообразных полимеров получил 485 К; Фуллер для ПММА при скоростях нагружения 200-650 м/с – 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.

По мнению исследователей, локальное повышение температуры связано с деформацией (за счёт диссипации энергии при пластическом перемещении микрообластей относительно друг друга) и разрушением (за счёт диссипации энергии,

выделяющейся при разрыве); причём вклад второго механизма более существен: Е.А. Егоров считает его до 55 % от общей энергии, Камбор – до 75 %, Вильямс – до 80-90 %.

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

**Механизм движения трещины в угольном массиве.** Общеизвестным для твёрдых тел является тот факт, что в вершине трещины (рис. 2, а) образуется зона с повышенной концентрацией напряжений. Диссипированная энергия частично уменьшает эти напряжения и возрастает в микрообъёме за счёт повреждённости материала. Температура в этом микрообъёме резко возрастает и изменяет структуру угля в некоторой области вблизи трещины. Так появляются зоны с изменённой структурой. В дальних от вершины областях образуются микродефекты, концентрация которых увеличивается, и в момент их слияния (очевидно, частичного) трещина скачкообразно прорастает по «ослабленному» материалу.

Примерно такая же картина наблюдается и при развитии макротрещины в реальном угольном массиве.

Макротрещина (рис. 2, б), ориентируясь в пространстве в зависимости от приложенного поля напряжений и особенностей угля развивается широким фронтом, и её устье выражено лишь в макроскопическом смысле. Микроскопически устье делится на множество трещин, которые на отдельных этапах прорастают самостоятельно, а затем сливаются между собой. При этом в устье каждой из трещин образуется локальный микрообъём ослабленного материала, и трещины получают возможность независимого движения. На определённом этапе развития трещин может происходить слияние отдельных локальных микрообъёмов в их вершинах и, как результат, будет наблюдаться дискретное движение макротрещины. После этого, как правило, происходят остановка фронта трещины, 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 изменённой структурой материала. Появление последних может быть связано также с термической неустойчивостью материала в локальных микрообъёмах. Известно, что с повышением температуры коэффициент диссипации резко возрастает (рис. 3). Это, в свою очередь, может вызвать повышение температуры нагрева микрообъёма, что увеличивает коэффициент диссипации и ещё

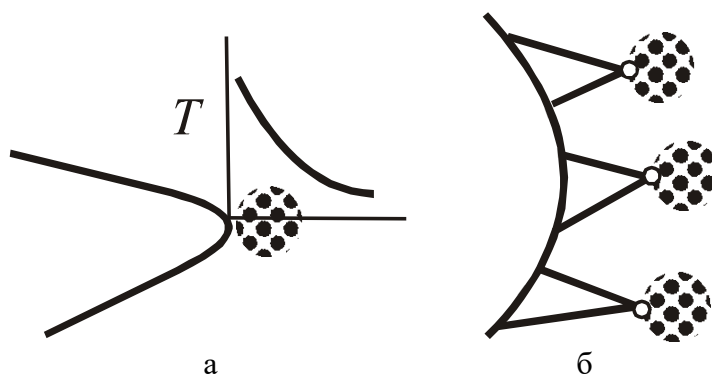


Рисунок 2 – К модели разрушения угля

больше повысит температуру саморазогрева вплоть до частичной термодеструкции материала.

Механизм движения макротрещины с учётом наличия в угольном пласте метана будет, естественно, иметь свои особенности. В нетронутом 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 самого различного размера. Объединяясь под действием силовых полей, древовидный ансамбль микротрещин создаёт определённые зоны с изменённой структурой вещества; в таких зонах будут более высокие температура и давление газа, повышенное производство энтропии и все химические реакции будут проходить более ускоренно. Геометрические размеры зон будут диктоваться величиной макротрещины, горным давлением, структурой угля, наличием свободного метана и т.д.

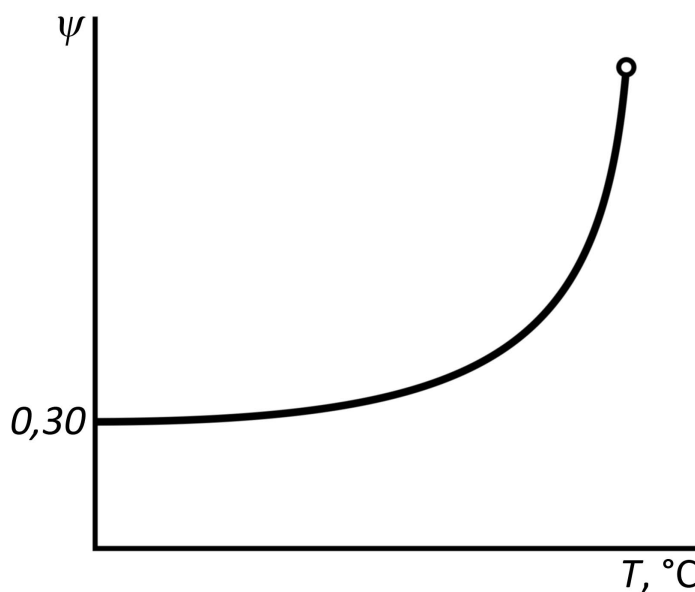


Рисунок 3 – Зависимость  $\psi(T)$

### ***1.6 Кластерно-синергетическая нелинейная эволюционно-структурная модель газодинамических явлений в угольном массиве***

Обобщая полученную экспериментальную информацию, выделим основные её 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 дискретностью; 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; образовавшиеся при этом зоны с изменённой структурой вещества могут объединяться между собой, образуя гигантскую флуктуацию (магистральную трещину), остановка которой в свою очередь может способствовать образованию 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;
- геометрические размеры очагов опасности будут диктоваться величиной макротрещины, горным давлением, структурой угля, его способностью к метаногенерации, наличием метана в свободном состоянии и т.д.

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 между собой и локально образуют зоны с существенно изменённой структурой вещества. Такие зоны некоторое время будут находиться в квазиравновесном состоянии, а колебания их основных параметров (напряжения, давление газа, скорости метаногенерации и т.д.) не будут выходить 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. Реально это выражается в росте древовидного ансамбля трещин и аномальной метаногенерации из движущихся трещин; диссипация энергии резко возрастает, что приводит к повышению температуры, а это в свою очередь повышает диссипацию энергии (рис. 3). Такое взаимодействие между температурой и диссипацией (реакция Франк-Каменецкого) приводит к резкому нелинейному повышению температуры; процесс из метастабильного превращается в лабильный, что приводит систему к тепловому взрыву. При этом сохраняется принцип температурно-временной суперпозиции (см. ниже).

Критериями теплового взрыва будут служить критерии подобия, известные как критерии Семенова или Франк-Каменецкого.

Если теплообмен в системе идёт быстрее, чем теплообмен с окружающим пространством (например, с угольным массивом) используется критерий Семенова – используется так называемая нестационарная теория теплового взрыва; условия «взрыва» определяются как условия прогрессивного увеличения разогрева системы, т.е. повышения температуры со временем реакции (рис. 4):

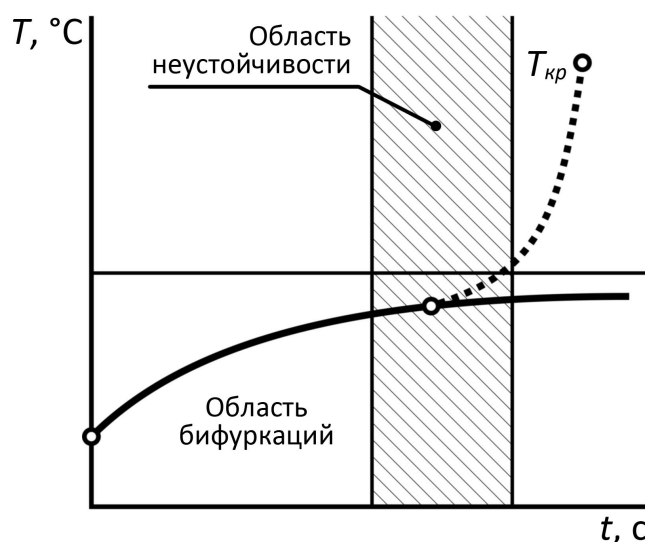


Рисунок 4 – Зависимость  $T(t)$

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

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)

$$F_k = \frac{Q}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} r^2 k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, К;  $Q$  – тепловой эффект реакции, кал/см<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества, кал/(см·с·град);  $E$  – энергия активации, кал/моль;  $r$  – характерный размер области взрыва, см;  $R$  – газовая постоянная;  $k_0$  – предэкспоненциальный фактор, с<sup>-1</sup>;  $V$  – объём реагирующего вещества;  $S$  – поверхность теплоотдачи;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, кал/(см<sup>3</sup>·с·град).

Для газодинамических явлений в угольном массиве более подходящей является нестационарная теория теплового взрыва Н.Н. Семенова, т.к. скорость протекания реакции (5-30) с такова, что теплообмен внутри очага опасности ГДЯ будет идти намного быстрее, чем теплообмен с окружающим угольным массивом вследствие низкой теплопроводности окружающей среды.

Рассмотрим нестационарную теорию теплового взрыва Н.Н. Семёнова более подробно.

В предположении, что температура в реакционном объёме распределена равномерно, скорость тепловыделения описывается кривой

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

а скорость теплоотвода – прямой

$$q_- = \frac{\alpha S}{V}(T - T_0).$$

Соотношение между количеством накапливающейся в системе теплоты и температурой обычно представляют в виде диаграммы Семенова (рис. 5).

Если условия теплообмена между системой (в рассматриваемом случае между очагом ГДЯ) и средой таковы, что температура окружающей среды  $T_0$  и линия  $q'_-$  пересекает линию  $q_+$ , в системе устанавливается постоянная температура  $T_1$  и тепловой взрыв не происходит. Если же при любой

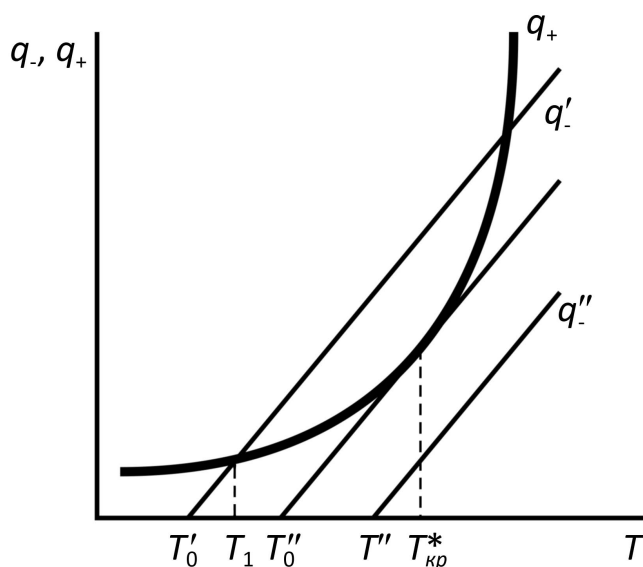


Рисунок 5 – Диаграмма Семёнова



температуре (этот вывод очень важен) теплоотвод меньше тепловыделения (прямая  $q''$ ,  $T_0 = T''$ ) – происходит тепловой взрыв. Критическое условие определяется касанием линий и выражается критерием Семенова.

## 2 Замечания к модели

- Тепловой взрыв очага опасности ГДЯ, как экзотермическая реакция I порядка становится возможным при случайном совпадении целого 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 газовыделением).
- ГДЯ может произойти и при остановке работ; в этом случае причины следующие: природные воздействия и релаксация пласта.
- Геометрические размеры зоны ГДЯ (полости) образуются в процессе теплового взрыва и связаны с двумя основными эффектами: в зоне практически отсутствует кислород – его не пропускает метан, находящийся под давлением, что исключает самовозгорание газа; второй эффект – при тепловом взрыве в зоне резко возрастают давление и температура, благодаря чему во время взрыва тонкодисперсные частицы угля забивают микротрещины образовавшегося объёма полости, препятствуя тем самым проникновению метана из окружающего угольного массива; грушевидная форма полости объясняется наличием объёмного древовидного ансамбля микротрещин.
- Среди информационных параметров, характеризующих ГДЯ, особенно следует выделить температуру, т.к. она присуща всем экзотермическим реакциям; 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 т.к. она присуща в равной степени (по величине сигнала) и малым трещинам и зонам ГДЯ различной величины.
- Из модели следует вывод: скорость проходки не играет существенной роли вплоть до «критического» приближения к очагу опасности; естественно, при этом следует учитывать «незначительные» очаги: за одну смену может быть несколько выбросов угля и газа малой интенсивности.
- Механизм газодинамических явлений удобно моделировать также с помощью теории катастроф (ГДЯ типичная катастрофа типа сборки, см. рис. 1).

- ГДЯ можно также моделировать как нерегулярное поведение нелинейной системы, непосредственно связанной с детерминированным многомерным хаосом; в этих случаях довольно трудно использовать математический аппарат: т.к. в зоне во время теплового взрыва будет переходной процесс с наличием мощных турбулентных потоков, математическое описание такого процесса весьма и весьма проблематично.
- Очаги разрушения пытаются моделировать свойствами самоорганизованной критичности нагружаемой среды (идеи С.П. Курдюмова в области нелинейной динамики). Используя эволюционные уравнения для описания кинетики накопления повреждений, авторы [6] сделали попытки создать модель (в основном для землетрясений), которая описывает как медленную квазистационарную фазу формирования очага будущего разрушения, включая наличие зон затишья, так и сверхбыстрый катастрофический этап разрушения.

### 3 Некоторые важные предпосылки

**1. Температура в очаге опасности ГДЯ.** При объёмном сжатии образцов угля Малинникова О.Н. [7] 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 не обладают достаточной полнотой, т.к. наряду с возможным повышением температуры от сорбции метана следует учитывать и экзотермические эффекты в устьях движущихся трещин. Несмотря на то, что микрообъёмы и длительность импульсов незначительны (доли  $\text{мм}^2$ , микросекунды), суммарный температурный эффект от движущегося ансамбля микротрещин может быть весьма значителен.

**2. Принципы температурно-временной суперпозиции.** Для упруго-наследственных 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). Применительно к рассматриваемой системе «уголь-метан» можно считать, что повышение температуры в очаге опасности ГДЯ, предположим на  $100^\circ\text{C}$ , 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 следует не исключать и влияние других факторов: давления газа, горного давления, структуры угля и т.д.

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

**3. Критическая температура в зоне ГДЯ.**  $T_{кр}$  – температура, при которой начинается спонтанный переход системы из метастабильного состояния в лабильное. Величина её для конкретных условий неизвестна (пределы примерно

600-800 °C). По мнению Н.Н. Семенова её величина может быть любой (весьма ценное утверждение).

**4. Трещиноватость угля.** Экспериментально установлено (ИГТМ НАНУ), что угли, извлечённые из зоны выброса, обладают повышенной трещиноватостью: на одном квадратном миллиметре находиться примерно 1000 субмикротрещин; в 1 мм<sup>3</sup> их более миллиона штук. При объёмном 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 метаногенерации.

**5. Роль воды.** При исследовании ГДЯ большинство учёных рассматривают систему «уголь-газ-влага», отмечая при этом важную роль воды; однако серьёзные работы в этой области отсутствуют, роль воды до настоящего времени ни на теоретическом, ни на экспериментальном уровне не определена; в работе [8] отмечается, что «количество выделившейся воды при диссоциации соответствующих объёмов гидрата метана зачастую должно быть равно, а порой даже и превышать объёмы 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 ненарушенной части пласта».

**6. Пласт не является «мёртвым»;** во времени он эволюционировал. Скорость эволюции (т.е. изменения структуры во времени) определялась прежде всего горным давлением. Энтропия (т.е. мера беспорядка) возрастала, росла диссипация энергии как основной источник устойчивости системы.

**7. Образование полости в зоне ГДЯ.** В процессе эволюции зона ГДЯ не имеет чётких границ, контуры её размыты. Конечные геометрические размеры полости формируются в момент теплового взрыва, когда «бешеная мука» запечатывает микротрещины полости, частично не пропуская кислород из пласта и создавая тем самым предельные размеры грушевидной ёмкости. По мнению [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 являются случайными, т.к. в основе их образования лежат термодинамические принципы и, в том числе, явление детерминированного хаоса. По мнению Трубецкого Д.И., возникновение детерминированного хаоса в сложных динамических системах состоит в следующем. Если в фазовое пространство поместить динамическую систему, то её 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 на широком экспериментальном материале.

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).

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

Как видно, на сегодняшний день учёные весьма смутно представляют сущность процессов, происходящих в зонах выброса угля породы и газа. М.В. Ломоносов в принципе был прав: «Велико есть дело достигать в глубину зелёную разумом, куда руками и оку досягнуть возбраняет натура, странствовать размышлением в преисподней, проникать рассуждением сквозь тесные расселины и вечною ночью помраченные вещи и деяния выводить на солнечную ясность». Следует отметить, что это высказывание относится к XVII веку, когда только зарождались основы науки о горном деле. Примерно в это же время Г. Агрикола назвал горное дело горным искусством – определение, не потерявшее актуальность и до настоящего времени. Поэтому так важны модели ГДЯ, наиболее полно учитывающие все многообразие явлений, происходящих в выбросоопасных зонах угольного массива.

Вместе с тем, несмотря на несомненные достижения в области эксперимента и на полученную информацию многолетних наблюдений, процессы, происходящие в зонах ГДЯ, по-прежнему остаются весьма слабо изученными.

Некоторые отрывочные и не всегда достоверные информационные данные можно получить при измерении температуры в местах, близких к зоне выброса. Наиболее достоверную информацию мы получаем уже после выброса при исследовании структуры угля из зоны газодинамического явления, определении количества метана, исследовании зоны выброса и т.д. Именно по этим данным можно судить о том, какие явления происходят в зоне выброса в период коллапса определённой части выбросоопасной зоны. Эту часть условно можно назвать ядром; в зоне выброса может быть несколько таких ядер с различной скоростью эволюции изменения структуры и газовыделения. В таких ядрах, как впрочем и в зоне выброса в целом, по сравнению с нетронутым массивом всегда будет более

высокая температура, давление свободного газа, повышенное производство энтропии, и все химические реакции будут происходить более ускоренно.

Известно [3, 4], что спусковым механизмом возникновения ГДЯ являются внешние малые возмущения природного или техногенного характера. Вместе с тем такое утверждение (хотя оно и прочно установилось в литературе и считается неоспоримым фактом) все же не обладает полнотой, т.к. не учитывает все явления, происходящие в самой зоне ГДЯ. Рассмотрим эти явления более подробно с учётом того факта, что в зоне выброса во время коллапса всегда возникают несколько ядер с различной скоростью эволюции и газовой выделения.

На определённом промежутке времени такие ядра будут находиться в квазиравновесном состоянии; при достижении основными параметрами некоторых критических значений под действием малых возмущений природного или техногенного характера квазиравновесное состояние нелинейной неравновесной системы может быть нарушено. По мнению авторов (и это подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями) в процессе эволюции зоны выброса существует асимметрия основных информационных параметров (давления, скорости метаногенерации и т.д.), что может привести к образованию малых возмущений, которые могут ингибировать процесс, обычно приводящий к тепловому взрыву. Уже первые исследования температуры в выбросоопасных зонах (равно как и ультразвуковая диагностика) показывают, что эти малые возмущения могут стать спусковым механизмом неустойчивости ядер.

Благодаря имитационной модели коллапса становится понятным, что даже малая асимметрия может стать причиной запуска процесса теплового взрыва.

Если же при этом существуют малые возмущения природного и техногенного характера, то вероятность ГДЯ существенно возрастает.

Такая симуляционная модель, т.е. модель, имитирующая физический процесс выброса при помощи искусственной термодинамической системы, была построена [2] на основе имеющейся обширной (но все же недостаточной) экспериментальной информации и фундаментальных принципов нелинейной неравновесной термодинамики. О её важности для инженерной горной практики можно судить хотя бы по тому неоспоримому факту, что большинство результатов промышленных и лабораторных экспериментальных исследований укладываются в рамки и допущения этой модели.

### **Выводы**

1. Сформулирована термодинамическая модель, объясняющая механизм образования и эволюции очагов опасности ГДЯ.

2. Установлена особая роль взаимосвязи диссипации энергии и температуры в угольном массиве как в упруго-наследственной среде, находящейся под действием объёмного сжатия. Именно эта взаимосвязь приводит к образованию объёмов с изменённой структурой угля; эти объёмы могут иметь различные размеры: от микрообъёмов до гигантских флуктуаций (5-10) м и больше.

3. Установлен механизм образования очагов опасности ГДЯ как флуктуаций различного размера, возникающих при движении трещин; в основе механизма

лежит взаимосвязь диссипации и температуры, а также локальность и дискретность механизма разрушения угля.

4. Установлена особая роль температуры в локальном объёме угольного массива, вызванной 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.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред: в 3 т. / А.Ф. Булат и др. Киев: Наук. думка, 2011. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. 568 с.
2. Булат А.Ф., Дырда В.И. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики. *Геотехническая механика*. 2013. Вып. 108. С. 3-31.
3. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф. Булат и др. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. 328 с.
4. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. К.: Наук. думка, 2010. 423 с.
5. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Чистоклетов В.Н. Прогнозирование неустойчивости системы уголь – газ. Донецк: Ноулидж, 2010. 343 с.
6. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформируемых твёрдых тел и сред и особенности формирования очагов разрушения. *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XXII Международной науч. школы им. акад. С.А. Христиановича. Крым, Алушта, 17-23 сентября 2012 г. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. С. 219-222.*
7. Малиникова О.Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 25.00.20. М., 2011. 47 с.
8. Опарин В.Н., Скрицкий В.А. О механизме зарождения процессов, завершающихся внезапными выбросами угля и газа. *Горная промышленность*. 2012. № 5. С. 56-58.

#### REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugо-nasledstvennykh sred. Tom 1. Mekhanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2013), "Some problems of gas-dynamic phenomena in coal massif in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics", *Geo-technical Mechanics*, no. 108, pp. 3-31.
3. Bulat, A.F., Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A. and Antsiferov, V.A. (2010), *Metanogeneratsiya v ugol'nykh plastakh* [Methane generation in coal seams], Lira Ltd., Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Alekseyev, A.D. (2010), *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
5. Alekseyev, A.D., Starikov, G.P. and Chistokletov, V.N. (2010), *Prognozirovaniye neustoychivosti sistemy ugol'-gaz* [Prediction of instability of the coal-gas system], Knowledge, Donetsk, Ukraine.
6. Makarov, P.V. (2012), "Self-organized criticality of deformable solids and media and features of the formation of foci of destruction", *Deformirovaniye i razrusheniye materialov s defektami i dinamicheskiye yavleniya v gornykh porodakh i vyrabotkakh* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings], *Proc. Of the 22d International scientific school named after S.A. Khristianovich*, 17-23 September 2012, Alushta, pp. 219-222.
7. Malinnikova, O.N. (2011), "Formation conditions and the methodology for predicting gas-dynamic phenomena during anthropogenic impact on coal seams", Abstract of Ph.D. dissertation, Institute of Problems of Integrated Mineral Resources Development of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
8. Oparin, V.N. and Skritskiy, V.A. (2012), "On the mechanism of the origin of the processes, culminating in sudden emissions of coal and gas", *Mining*, no. 5, pp. 56-58.

#### Об авторах

**Булат Анатолий Фёдорович**, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор,

директор інститута, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), г. Дніпро, Україна, [gtm.bulat@gmail.com](mailto:gtm.bulat@gmail.com)

**Дырда Виталий Илларионович**, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом механіки еластомерних конструкцій горних машин, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), г. Дніпро, Україна, [vita.igtm@gmail.com](mailto:vita.igtm@gmail.com)

### About the authors

**Bulat Anatolii Fedorovich**, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [gtm.bulat@gmail.com](mailto:gtm.bulat@gmail.com)

**Dyrda Vitalii Illarionovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [vita.igtm@gmail.com](mailto:vita.igtm@gmail.com)

**Анотація.** На основі великої експериментальної інформації була побудована кластерно-синергетична еволюційно-структурна модель газодинамічних явищ (ГДЯ) у вугільному масиві. Її основу склали наступні основні положення. У вугільному масиві осередки небезпеки ГДЯ утворюються переважно в геологічний час під впливом тектонічних і геохімічних процесів: можливе утворення їх і в історичний час. Еволюція системи вугілля - газ - волога відрізняється локальністю та дискретністю. У вершині тріщини, що рухається, локальний розігрів може досягати часткової термодеструкції речовини, що сприятиме інтенсивній метаногенерації та дробленню вугілля аж до утворення наночастинок.

Мікротріщини в вугіллі здатні дисипувати, тобто розсіювати енергію, яка зменшує напруження в устях тріщин і зупиняє їх зростання. Сформовані при цьому зони зі зміненою структурою речовини можуть об'єднуватися, утворюючи гігантську флуктуацію (магістральну тріщину), зупинення якої передбачає утворення осередку небезпеки.

В осередках небезпеки в порівнянні з незмінним масивом завжди будуть більш висока температура, тиск вільного газу, підвищене виробництво ентропії та всі хімічні реакції будуть проходити більш прискорено.

Приймаючи ці положення, модель газодинамічних явищ можна представити в наступному вигляді.

В системі вугілля – газ – волога в процесі еволюції осередку небезпеки під дією гірського тиску і тиску газу концентрація мікротріщин зростає аж до стану, коли вони починають зливатися та локально утворюють зони з істотно зміненою структурою речовини. Такі зони деякий час знаходяться в квазірівноважному стані, а коливання їх основних параметрів (напруження, тиск газу, швидкість метаногенерації тощо) не виходять за допустимі межі.

При досягненні основними параметрами деяких критичних значень під дією малих збурень техногенного або природного характеру квазірівноважний стан нелінійної нерівноважної системи може бути порушено. Це виражається в зростанні деревовидного ансамблю тріщин і аномальної метаногенерації з рухомих тріщин; дисипація енергії різко зростає, що підвищує температуру та дисипацію енергії. Така взаємодія між температурою та дисипацією призводить до різкого нелінійного збільшення температури; процес з метастабільного перетворюється в лабільний, що призводить систему до теплового вибуху. При цьому зберігається принцип температурно-часової суперпозиції.

Критеріями теплового вибуху будуть критерії подібності, відомі як критерії Семенова або Франк-Камеєцького.

На основі сучасних концепцій нелінійної нерівноважної термодинаміки сформульовані важливі зауваження до моделі газодинамічних явищ у вугільному масиві. Показано, що в зоні викиду в період колапсу певні частини зони (ядра) мають різну швидкість еволюції структури та газовиділення. На думку авторів в процесі еволюції зони викиду виникає асиметрія основних інформаційних параметрів (тиску, швидкості метаногенерації тощо), що може привести до утворення малих збурень, які можуть інгібувати процес, який призводить до теплового вибуху. Таким чином, поряд із зовнішніми збуреннями природного і техногенного характеру мала асиметрія внутрішніх параметрів ядер може також стати причиною запуску процесу теплового вибуху.

**Ключові слова:** імітаційна модель, газодинамічні явища, вугільний масив, колапс, тепловий вибух, викид вугілля і газу, динамічні явища

**Abstract.** Based on extensive experimental information, a cluster-synergetic evolutionary-structural model of gas-dynamic phenomena (GDP) in a coal mass was constructed. It was based on the following key points. In the coal massif, hotbeds of danger of GDP are formed mainly in geological time under the influence of tectonic and geochemical processes: their formation in historical time is also possible. The evolution of the coal – gas – moisture system is local and discrete. At the apex of a moving crack, local heating can achieve partial thermal destruction of the substance, which will contribute to intense methane generation and crushing of coal, up to the formation of nanoparticles.

Microcracks in the coal can dissipate, i.e. dissipate energy, which reduces stresses in the mouth of cracks and stops their growth. The zones formed with the changed structure of the substance can be combined to form a gigantic fluctuation (main crack), the stopping of which involves the formation of a source of danger.

Compared to the untouched massif, danger zones will always have a higher temperature, free gas pressure, increased entropy production, and all chemical reactions will proceed more rapidly.

Accepting these provisions, the model of gas-dynamic phenomena can be presented as follows.

In the coal – gas – moisture system, during the evolution of the source of danger under the influence of rock pressure and gas pressure, the concentration of microcracks increases up to the state when they begin to merge and locally form zones with a substantially changed structure of the substance. Such zones are in a quasi-equilibrium state for some time, and the oscillations of their main parameters (stress, gas pressure, methane generation rate, etc.) do not go beyond the permissible limits.

When the basic parameters reach some critical values under the influence of small perturbations of anthropogenic or natural nature, the quasiequilibrium state of a nonlinear nonequilibrium system can be violated. This is expressed in the growth of a tree-like ensemble of cracks and anomalous methane generation from moving cracks; energy dissipation increases sharply, which increases the temperature and energy dissipation. Such an interaction between temperature and dissipation leads to a sharp nonlinear increase in temperature; the process from metastable turns into labile, which leads the system to thermal explosion. At the same time, the principle of temperature-time superposition is preserved.

The criteria for a thermal explosion will be similarity criteria, known as the Semenov or Frank-Kamenetsky criteria.

Based on modern concepts of nonlinear nonequilibrium thermodynamics, important remarks are formulated for the model of gas-dynamic phenomena in a coal mass. It is shown that in the ejection zone during the collapse period, certain parts of the zone (core) have different rates of structure evolution and gas ejection. According to the authors, in the evolution of the ejection zone, an asymmetry of the main information parameters (pressure, methane generation rate, etc.) arises, which can lead to the formation of small disturbances that can inhibit the process, which usually leads to a thermal explosion. Thus, along with external disturbances of a natural and technogenic nature, the small asymmetry of the internal parameters of the nuclei can also cause the start of the thermal explosion process.

**Keywords:** simulation model, gas-dynamic phenomena, coal mass, collapse, thermal explosion, coal and gas emissions, dynamic phenomena

*Статья поступила в редакцию 03.02.2020*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*