

А.Ф. Булат, акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор  
В.И. Дырда, д-р техн. наук, профессор  
(ИГТМ НАН Украины)

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНОМ МАССИВЕ В КОНТЕКСТЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

**Аннотация.** На основе современных концепций нелинейной неравновесной термодинамики сформулированы физические модели газодинамических явлений в угольном массиве.

**Ключевые слова:** динамические явления, газодинамические явления (ГДЯ), внезапные выбросы угля и газа (ВВ), выбросоопасные зоны (ВЗ), газовые явления (ГЯ)

A.F. Bulat, Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor  
V.I. Dyrda, D. Sc. (Tech.), Professor  
(IGTM NAS of Ukraine)

## SOME PROBLEMS OF GAS-DYNAMIC PHENOMENA IN COAL MASSIF IN THE CONTEXT OF NONLINEAR NONEQUILIBRIUM THERMODYNAMICS

**Abstract.** Physical models of gas-dynamic phenomena in coal massif are formulated on the basis of the modern concept of nonlinear nonequilibrium thermodynamics.

**Keywords:** dynamic phenomena, gas-dynamic phenomena, sudden coal and gas emissions, emission-dangerous zones, gas phenomena

### Оглавление

1. Предисловие
2. Современное состояние изученности проблемы газодинамических явлений
3. Краткие обобщения для дальнейших исследований
4. Кластерно-синергетическая модель газодинамических явлений
5. Замечания к модели
6. Некоторые важные предпосылки
7. Список литературы

### 1 Предисловие

Газодинамические явления (ГДЯ) в угольных пластах – грозное природно-техногенное явление. Здесь природные факторы и человеческая деятельность слились в единый коллективно-функциональный процесс и вероятность в полной мере правит бал: случайные совпадения многих факторов и малые возмущения извне приводят в действие таинственный механизм спонтанного лавинообразного выброса угля и газа из особых выбросоопасных зон. По мнению многих специалистов без человеческой деятельности газодинамические явления не происходят: это похоже на спящую красавицу – «спящая опасность», которую неосторожно разбудили, совершенно не ожидая последствий, а если и ожидали, то уголь всё-таки добывать нужно.

Динамические и газодинамические явления в шахтах – проблема междисциплинарная, охватывающая научные, технические, социальные, экономические и правовые вопросы. Её важные составляющие: понятие причин и механизма явлений (построение физических и математических моделей); динамика массива и

прогнозирование его состояния; разработка технологий безопасной добычи угля. В настоящей работе рассматривается первая составляющая проблемы.

Исследуемой проблеме посвящена довольно обширная литература; часть её цитируется ниже [1-27].

Авторы разделяют мнение многих учёных по вопросам терминологии и основных понятий при исследовании указанной проблемы.

**Терминология:** динамические явления; газодинамические явления (ГДЯ); внезапные выбросы угля и газа (ВВ); очаги опасности ГДЯ; выбросоопасные зоны (ВЗ), газовые явления (ГЯ); зоны (полости) ГДЯ.

### **Цель работы**

1. На основе современных подходов нелинейной неравновесной термодинамики сформулировать физические модели ГДЯ с учётом доступной экспериментальной информации.

2. 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 т.д.

## **2 Современное состояние изученности газодинамических явлений**

### **Общепринятые заключения:**

- **Динамические явления:** шелушение, стреляние, горные удары, техногенные землетрясения.
- **Газодинамические явления (ГДЯ)** – внезапные выбросы, внезапные высыпания и отжимы, сопровождающиеся газовыделением, прорывы газа.
- **Горно-тектонический удар** и техногенное землетрясение – мгновенная подвижка пород по тектоническому нарушению или прорастание крупной (магистральной) трещины в массиве с образованием опережающих трещин. Одна из причин ВВ – тектоническая нарушенность массива.
- **Некоторые различия:** отжим – нет мелкой фракции, отсутствует повышенная температура, время  $t = 0,2$  с; длина зоны  $l = (0,5 \div 1,0)$  м, газовыделение; ГДЯ – наличие мелкой фракции (вплоть до наночастиц);  $t = (5 \div 30)$  с, аномальное газовыделение; повышенная температура.
- **ГДЯ** – процесс спонтанного лавинного самоподдерживающегося разрушения и перемещения угля; большинство ГДЯ происходит на крутых пластах со слабым и «перемьятым» углём (**тектонически «перемьятым»**). Также ГДЯ происходят у зон мелкой нарушенности пласта – разрывные формы микротектоники, мелкая пликвативная складчатость, т.е. в местах, где наблюдается эффект задержки деформаций и возрастания концентрации напряжений.
- **Причины ГДЯ:** технологическая деятельность человека (95 %): 90 % – сотрясательные взрывы, 5 % – работа добывающих механизмов; малые возмущения (А.Ф. Булат); скачкообразное изменение напряжённого состояния вследствие техногенной деятельности (Ходот); тектонические напряжения; рост трещины при НДС (энергетическая теория Петухова и Линькова); превалирующая

роль газовой выделения, находящегося под высоким давлением; потеря устойчивости в локальных местах угольного массива; природные землетрясения.

- **Угли пластов**, опасных по ВВ, отличаются по прочности, обладают «перемежностью» и наличием трещин **тектонического** происхождения.
- **Предвестники ВВ**: повышение акустической активности; повышенная температура; задержка отжима пласта и сближения боковых пород; шелушение и «стреляние» пород на поверхности выработки; повышенное газовыделение и выход штыба при бурении шпуров.
- **Внезапные выбросы** приурочены к узким зонам, площадь которых не превышает 5-10 % вынимаемой площади пластов [14]; по другим источникам ~ 3 % [5].
- При ВВ происходит **взрывоподобное** (но это не взрыв) газовыделение с выбросом в выработки метана (скорее смеси газов) и измельчённого угля, после которого в массиве остаются характерные полости; в ряде случаев это может привести к крупным катастрофам [11, 12].
- Имеется предположение о псевдосжижении как механизме выноса угля при ВВ: вынос угля подобен истечению сыпучей массы на пневмоподушке.

## 2.1 Исследование некоторых важных параметров

### 2.1.1 Образование зон высокодисперсного угля

Экспериментально установлено, что при нагружении **образцов** угля при сдвиговых напряжениях образуются зоны высокодисперсного угля (10-50000 нм); процесс разрушения сопровождается эмиссионными явлениями (акустическими и электромагнитными импульсами); в этих зонах изменяется микропоровая структура угля, состав угольного вещества, электризация поверхностей, тепловые эффекты (температура повышается), выделение газа – в результате стабильная система становится метастабильной; при разгрузке образца быстро развиваются микротрещины, заполненные метаном [10].

Авторы работ [8, 10, 20] отметили следующее:

- зоны высокодисперсного угля являются зонами неустойчивости (переход метана из связанного состояния в свободное при разгрузке пласта) – эти микрозоны содержат наночастицы (до 10 %) и оказывают существенное влияние на поведение системы в макромасштабе;
- в зонах интенсивного пластического деформирования и разрушения пород (в зонах тектонических разломов) образование высокодисперсных фракций (особенно при объёмном сжатии) **обладает автомодельностью** и зависит от фрактальной размерности раздробленного материала;  $d_f = 2,58$ ; доля частиц < 1 мкм составляет 0,1 %;
- дезинтеграция угля при объёмном сжатии предполагает более высокую долю высокодисперсных частиц;
- наличие пьезоэлектрических свойств угля способствует цепному характеру образования трещин и созданию акустических полей, которые могут вызывать кавитацию в тонких жидкостных плёнках на горной породе [6]; многие авторы отрицают цепной характер образования трещин.

### 2.1.2 Феномен аномального выделения метана при ГДЯ

По мнению авторов работ [8, 20] на первой стадии ВВ разрушение угля происходит в условиях объёмного НДС с дополнительным (3-7 т/м<sup>3</sup>) образованием метана (механико-химический эффект) за счёт частичного диспергирования алифатической части вещества угля на микроуровне.

На второй стадии разрушения угля за счёт энергии выделяющегося газа происходит отрыв; развитие и образование микротрещин происходит в условиях свободных для деформации; разрушение носит множественный **взрывной** характер во всем объёме блока и приводит к высокой степени диспергирования угля, в том числе и на молекулярном уровне с образованием метана (до  $51 \text{ м}^3/\text{т}$  и больше; в ряде случаев до  $200 \text{ м}^3/\text{т}$ ).

**При исследованиях газовыделения рядом авторов отмечено следующее:**

- основной объём газа при выбросе выделяется непосредственно из разрушающегося угля [8];
- механохимический эффект образования метана наблюдается при разрушении угля сдвигом в условиях неравнокомпонентного сжатия и высоких напряжений, при минимальном главном напряжении  $\sigma_3 > (5 \div 7) \text{ МПа}$ . Эффект начинает фиксироваться при достижении максимальным главным напряжением  $\sigma_1$  значений  $0,7-0,8$  от предела прочности угля и тем сильнее, чем более пластичным является процесс разрушения (коэффициент спада напряжений в запредельной области  $s > 0,75$ ) [8];
- 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 –  $\text{CH}_3$ . Эти химически активные радикалы, объединяясь с атомами водорода, образуют метан, причём дополнительно образованные объёмы метана по оценкам реальных выбросов составляют  $40 \div 50 \text{ м}^3/\text{т}$  [8];
- в процесс разрушения угольного массива при внезапном выбросе угля и газа основное количество метана (отнесённое к единице выброшенного угля), часто превышающее газоносность угольного пласта в несколько (иногда в  $7 \div 10$  раз); газ выделяется непосредственно из разрушающегося и выбрасываемого угля [8];
- скорость выхода метана из угля определяется возможностями фильтрационной системы, которая зависит от системы трещин и горного давления;
- установлено, что механические воздействия на угли сопровождаются химическими превращениями с разрывом молекулярной цепи и выделением газообразных продуктов; такая механохимическая деструкция приводит к мелкому дроблению угля (фракции размером  $0,08 \text{ мм}$  могут составлять  $14 \div 37 \%$  массы выброса); при этом сокращается доля диффузии и фильтрации, а процесс газовыделения становится **мгновенным**, поэтому наряду с тремя факторами выбросоопасности (напряжение, газ и физико-механические свойства) следует учитывать структурно-химический фактор [6].

### *2.1.3 Температурные эффекты в угольном пласте*

Ряд авторов экспериментально подтверждают наличие повышенной температуры в зоне выброса. В частности, авторы работ [8, 20] отмечают следующее:

- повышение температуры угольного пласта является **информативным показателем**: с его помощью можно выделить зоны повышенного горного давления и зоны разгрузки и дегазации. Повышение температуры угля связывают с сорбцией «дополнительного» метана, образовавшегося в результате механохимических процессов деструкции наиболее слабых связей в угле; многими авторами отмечается статическая связь изменения температуры призабойной зоны с выбросоопасностью, но пока нет теории, объединяющей и объясняющей весь экспериментальный материал;

- экспериментально в условиях объёмного сжатия (образцы угля 40×60 мм, давление до 5 МПа) отмечено повышение температуры  $\Delta T \geq 3$  °С; объяснение – дополнительная сорбция метана в процессе разрушения угля;
- повышение 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;
- исследования показали, что в призабойной зоне угольного пласта (3-10 м от забоя) **может образоваться техногенный очаг выбросоопасности**, который хорошо определяется по изменению температуры от зоны концентрации напряжений до груди забоя;
- образование природно-техногенного очага опасности характеризуется резким ростом концентрации потенциальной энергии упругого сжатия в призабойной зоне угольного пласта и механохимическим процессом генерирования дополнительного количества метана из угля в условиях высоких напряжений объёмного сжатия и деформирования. Расчёты, выполненные для различных пластов Донбасса показали, что в очаге выбросоопасности может образовываться до 8 м<sup>3</sup>/т метана перед очистным забоем и до 5÷6 м<sup>3</sup>/т перед подготовительным. Этого дополнительного метана достаточно, чтобы ситуация, с учётом возросшей нарушенности пласта, стала опасной по внезапным выбросам угля и газа [8].

## 2.2 Информативные параметры

- **Очаги (зоны) опасности ГДЯ:** полости грушевидной или причудливой формы; размер 5-15 м (иногда 10-100 м).
- **Интенсивность ГДЯ:** от 10 кг до 14000 т (1967 г., 800 м, выработку завалило на 0,8); 5-50 т – 70 % всех случаев; больше 1000 т – редко.
- **Структура материала при выбросе:** больших глыб нет; «бешеная мука» – до 40 %; наночастицы – до 10 %; в основном мелкий уголь 0,2÷0,4 мм (есть 2-4 мм).
- **Локальность и частота выбросов:** 2-3 т часто; больше 100 т – редко.
- **Газовыделение:** средняя насыщенность газом пласта – 19 м<sup>3</sup>/т; при ГДЯ – дополнительно 40-60 м<sup>3</sup>/т (Воркута – 200 м<sup>3</sup>/т, Донецк – 600 м<sup>3</sup>/т).
- **Время ГДЯ:** продолжительность – 5-10 с.
- **Давление в пласте:**  $q = 25-30$  атм. (иногда – 50 атм.): при  $q = 2-5$  атм. может быть ГДЯ, и не быть при 25 атм. (т.е. давление не является определяющим).
- **Механические характеристики угля:** коэффициент диссипации энергии  $\psi = 0,3$ ; объёмный модуль сжатия  $K = (3\div 4)E$ ; фрактальность нормального угля  $d_f = 2,8\div 2,9$ ; из зоны ГДЯ –  $d_f = 2,58$ .
- **Температура:** если в забое 30-35°С, то превышение температуры в зоне ВВ  $\Delta T = 20-30$  °С; в забое есть зоны с раскалённым углём; на расстоянии 12 м от забоя в скважине  $\Delta T = 12$  °С [8].
- **Полость после выброса:** поверхность забита высокодисперсными частицами, т.е. трещины закрыты, и доступ газа из пласта не происходит [8].
- **Наличие электротехнических полей:** при экспериментальном сжатии образца наблюдается всплеск сигнала электричества (А.Ф. Булат).

## 2.3 Физические модели газодинамических явлений

Согласно современным представлениям, опасность возникновения газодинамических явлений в шахтах определяют три основных фактора [9]:

- горное давление (напряжённо-деформированное состояние массива горных пород);
- газоносность и давление газа в массиве горных пород;
- физико-механические и физико-химические свойства, геологическое строение и тектоническая нарушенность горных пород.

### *2.3.1 Геологические модели*

- В течение миллионов лет вследствие многократных тектонических подвижек земной коры в массиве сформировалось и действует неравномерное поле распределения напряжений. Такой природный тектонически нарушенный горный массив **способен порождать** ГДЯ при нарушении его равновесного состояния. Главный источник сил, инициирующий ГДЯ – высокий уровень действующих тектонических напряжений [13, 15].
- Доставка метана из глубин в рабочие горизонты шахт осуществляется по каналам дегазации, в качестве которых выступают «тела брекчирования» (Э.В. Сокол); на многих из них следы древних геологических пожаров; таковыми могут быть и «роевые скопления» очагов землетрясений малой мощности (А.Ф. Еманов). Это объясняет появление больших объёмов и выход горящих газов из недр при землетрясениях; показывает также древность (геологический возраст) зон ВВ – **«человеческого фактора не было, а пожары и взрывы уже были»** [11, 12].

### *2.3.2 Геомеханическая модель возникновения ГДЯ*

Газодинамические явления происходят вследствие потери устойчивости призабойной зоной угольного пласта и перехода к лавинному разрушению при совместном действии газа и горного давления во время подвигания забоя подготовительной или очистной выработки. Основным фактором, определяющим способность массива горных пород к самоподдерживающемуся лавинному разрушению является запас потенциальной упругой энергии сжатых пород и содержащегося в них газа. При этом плотность (уровень) упругой энергии во всем объеме разрушающегося массива горных пород должна быть некоторой критической для данного геоматериала, условий напряжённо-деформированного состояния, величины энергоёмкости разрушения  $A$  [8].

Явление самоподдерживающегося лавинного разрушения происходит за счёт высвобождения (сброса) избыточной упругой энергии горных пород (и газа, при внезапных выбросах) в разрушающем массиве горных пород. Условием инициирования лавинного самоподдерживающегося разрушения является быстрое образование новой свободной поверхности (при подвигании забоя горной выработки) с сопутствующей ей волновой разгрузкой, в которой возникает волна разрушения при условии, если всегда плотность упругой энергии больше энергоёмкости разрушения  $W > A$  [8].

### *2.3.3 Модель формирования природно-техногенного очага опасности динамических явлений в призабойной зоне угольного пласта*

По мнению авторов работ [8, 20] очаг формируется в области влияния геохимической и тектонической нарушенности пласта в том случае, если затруднено деформирование призабойной зоны угольного массива в сторону забоя, и характеризуется резким ростом концентрации потенциальной энергии упругого сжатия

и механохимическим процессом генерирования дополнительного метана из угля при его разрушении. Эффект образования метана наблюдается в условиях неравнокомпонентного сжатия. Авторы считают, что на выбросоопасном пласте горизонта 790 м в забое очистной выработки (Донбасс) им по изменению **температуры** удалось зафиксировать очаг подготовки динамического явления [22].

#### 2.3.4 Модель разрушения очага опасности ГДЯ

По данным физического моделирования установлено [8], что разрушение газонасыщенного угля, находящегося в объёмном неравнокомпонентном напряжённом состоянии ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) начинает происходить при выполнении условия  $\sigma_3' / \sigma_1' = C \leq 0,33$ , где  $\sigma_3'$  и  $\sigma_1'$  – минимальное и максимальное «эффективные» напряжения, которые определяются как разность между внешними напряжениями  $\sigma$ , приложенными к твёрдому веществу угля и внутривещевым давлением газа  $P$ :  $\sigma' = \sigma - mP$ , где  $m$  – коэффициент, зависящий от тектонической нарушенности угля. При  $C > 0,33$  разрушение не происходит и возможно развитие процесса дальнейшего роста концентрации напряжений и, соответственно, упругой энергии в массиве. Иными словами зависимость разрушающего напряжения  $\sigma_{1max}$  от  $\sigma_3$  можно представить в виде соотношения  $\sigma_{1max} \geq 3\sigma_3$ .

Применительно к объяснению **механизма формирования очага опасности газодинамических явлений** – это означает, что в условиях геологических нарушений, где затруднено деформирование призабойной части массива в сторону забоя, происходит возрастание напряжений  $\sigma_3$ , действующих со стороны забоя, что влечёт за собой создание условий для ещё более сильного возрастания нормальных к угольному пласту напряжений  $\sigma_1$  вблизи обнажения пласта забоем. В результате этих процессов изменения напряжённого состояния пласта происходит резкое увеличение **опасности возникновения газодинамических явлений**.

Механизм потери устойчивости и перехода обычных видов хрупко-пластического разрушения к лавинному самоподдерживающемуся в первом приближении может быть представлен следующим образом. В натуральных условиях во время подвигания горной выработки в призабойной зоне угольного пласта происходит процесс снятия напряжения сжатия  $\sigma_3$  по оси ориентированной в сторону забоя. Этот процесс сопровождается скачкообразным падением прочности угля на более низкий уровень в зависимости от величины снимаемого бокового напряжения. Данный момент является характерной точкой бифуркации, определяющей, по какому пути пойдёт дальше развитие процесса разрушения – обычного трещинообразования и отжима лавинного самоподдерживающегося разрушения или характерного для газодинамических явлений.

Экспериментально установлено, что критериальными условиями, определяющими возможность возникновения лавинного разрушения, являются следующие два. Во-первых, запас реализуемой потенциальной геозэнергии (упругой энергии сжатия угля при горных ударах и суммы упругой энергии сжатия и энергии выделяющегося газа при внезапных выбросах угля и газа) должен быть выше  $(0,3 \div 0,5)$  МДж/м<sup>3</sup>. Во-вторых, характерная скорость сброса бокового напряжения не должна быть ниже  $(1 \div 3)$  МПа/с.

Дополнение к модели: нетронутый метанонасыщенный угольный пласт является равновесной системой «уголь-метан-природная влага». Под влиянием техногенного воздействия (изменение НДС) в нем происходят необратимые структурные изменения на уровне микроструктур, содержащих молекулы растворенного метана [8].

## 2.4 Модели газодинамических явлений (по работам ИГТМ НАН Украины)

### 2.4.1 Модель образования зон ГДЯ

- В угольном пласте в течение геологического времени под влиянием тектонических и геохимических процессов **формируются области с аномальными** физико-химическими и механическими свойствами на всех уровнях структурной организации вещества [3].
- Геологические нарушения являются участками локального многократного (во времени) повышения интенсивности действия на уголь механических напряжений ( $\sigma$  и  $T$  измерить невозможно).
- Уголь в зонах ВВ отличается от «обычного» угля фрактальностью, большей трещиноватостью, но молекулярная перестройка не замечена [3].
- Нетронутый угольный пласт находится в термодинамическом равновесии; при разработке происходит изменение термодинамических параметров, НДС и температуры, а сам пласт приобретает новое равновесное состояние за счёт изменения метаморфизма [3].

### 2.4.2 Модель механизмов ГДЯ

**Модель – энергетическая теория** – внезапные выбросы происходят под действием напряжённого состояния горного массива и давления газа; освобождается потенциальная энергия и газ отбрасывает разрушенный уголь в выработку.

**Термобарогеохимическая модель:** на выбросоопасных участках при выемке угля при действии сжимающих напряжений система «уголь-газ» из метастабильного состояния переходит в неустойчивое: этот процесс сопровождается саморазрушением системы и высвобождением газа из микродефектов; далее выброс по модели Христиановича.

К этой модели позже были добавлены механоэлектрические и механохимические эффекты – сопутствующие явления (электрические заряды, электронная плазма, механохимические реакции и т.д.) [3].

Между зоной коллектора и горной выработкой возникают существенные градиенты напряжений и давления газа и если механическая прочность перемычки (пробки) недостаточна, происходит лавинообразное истечение метана [3].

#### Примечания к моделям ГДЯ

- Известно, что угли газонепроницаемы, однако если нет проницаемости, то нет и фильтрации. Если метан находится только в свободном состоянии в некоторой пустоте, то при ВВ будет воронка, а грушевидная форма может появиться только в результате образования древовидной системы трещин [3].
- По мере повышения **степени метаморфизма** вещества угля, **изменялось и соотношение его фракций**, и наличие свободного метана в порах и трещинах; угольный пласт во времени подвергался также горному давлению (с изменением градиента во времени), тектоническим землетрясением и т.д., что оказывало влияние на метаногенерацию. Таким образом, угольный пласт не оставался постоянным во времени ни по структуре, ни по газоносности.

### 2.4.3 Модели угля

- Природный уголь – сложный продукт длительного воздействия на растительные остатки биологических, химических и тектонических факторов в условиях высоких температур и давлений.
- Уголь изначально обладает пустотами – поры (открытые и закрытые), трещины.



- Природный уголь представляет собой осадочную породу, в состав которой входят неорганические кристаллические минералы и органические углеродсодержащие вещества [3].
- Метаморфизм углей сопровождается низкотемпературным термохимическим распадом органического вещества (ОВ); преобразования происходят произвольно и ускоряются с повышением температуры.
- Природная газонасыщенная система «уголь-газ-влага» – сложное полидисперсное микропористое образование, динамические характеристики которого могут изменяться в диапазоне трёх порядков; это наноматериал.
- Композит «уголь-газ-влага» – активная нелинейная система, которая под внешним воздействием претерпевает цепь структурно-композиционных неравновесных фазовых переходов и химических превращений, сопровождаемых волновыми процессами различной природы, в том числе упругими волнами напряжений и деформаций [3].

#### 2.4.4 Модели метаногенерации

Термин «метаногенерация» уместно применять только к процессам, время протекания которых не превышает периода техногенного вмешательства в пласт.

##### Три модели метаногенерации:

- **Первая** (геологическая) – образование угля и накопление метана происходило в течение сотен миллионов лет из органических остатков в сопровождении воды при высоких колебаниях давления и температуры.
- **Вторая** (геологическая) – глубинное образование газа с последующей его диффузией в сторону земной поверхности и накоплением его в угольных пластах благодаря большой сорбционной способности.
- **Третья** модель – генерация метана в угольном пласте происходила под воздействием природных и техногенных факторов.

##### Четыре гипотезы метаногенерации

- **Первая** – под влиянием горного давления.
- **Вторая** – физико-химическая гипотеза – метан образуется под давлением техногенных и природных тектонических процессов в пласте.
- **Третья** – метан образуется в результате каталитических процессов в угольном пласте.
- **Четвёртая** (основная):

Зону внезапного выброса следует рассматривать как «котёл» генерации метана, о чем свидетельствует 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.

- В угле имеются графитоподобные включения, связанные между собой углеводородной бахромой, характерной для алифатических групп; при расходе бахромы образуется метан (при температурах  $> 30$  °C); при этом энтропия быстро возрастает; процесс происходит спонтанно (чем выше температура, тем быстрее процесс).
- Чем больше глубина залегания пласта, тем больше накапливается бахрома, склонная к расходу (при разгрузке массива); под термином «расход бахромы» подразумевается химическая генерация метана.
- Комплексными атомарно-молекулярными исследованиями, подтверждёнными физическим моделированием, установлен механизм аномальных газопроявлений при разработке угольных пластов, который состоит в генерации метана в

результате механохимической реакции его синтеза, которая протекает при деструкции алифатической части угольного вещества, благоприятных термодинамических условиях и наличии соответствующих катализаторов реакции [3].

- За счёт высокого **давления газа образуется микротрещина**, рост которой сопровождается механоэлектрическими явлениями, генерацией метана и его дополнительной десорбцией, ростом давления.
- За счёт 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 определённых 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 приращение длины трещины. Главным условием является достаточная разгрузка пласта, высокая метаноносность угля и низкое значение удельной энергии образования свободной поверхности.

#### **Примечания к метаногенерации**

- Процессы образования метана протекали одновременно с формированием угольных пластов и преобразованием первичного органического вещества.
- В системе «уголь-порода-метан-влага» газ находится в трёх состояниях: свободном, сорбированном (связанном) и в виде твёрдого раствора.
- Процесс образования метана до конца не ясен: версия первая – процесс превращения органического вещества в уголь под действием  $\sigma$ ,  $T$ ; вторая – термодинамическая модель формирования метана (молекулярного метана в природе не существует [3]).
- Метан образуется в результате низкотемпературного крекинга угольного органического вещества (ОВ) на протяжении геологических эпох; большинство метана накапливается в зонах (они могут быть зонами вторичной механохимической активации), генерирующими газ. Из практики известно, что зоны – это области, где происходит концентрация механических напряжений при разрывных и складчатых деформациях угольных пластов; с этими зонами связаны ГДЯ.
- Существенный вклад в выделение метана вносят механоэлектрические эффекты, но они не являются определяющими.

### **3 Краткие обобщения для дальнейших исследований**

1. Проблема ГДЯ возникла более 100 лет тому, однако её актуальность не уменьшается особенно в связи с добычей угля на больших глубинах (ш. Скочинского – больше 1200 м, ш. Засядько – больше 1300 м).

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 газовыделение. 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).

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

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

##### **4.1 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.

##### **4.2 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.

### **4.3 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.

#### **4.4 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 [1, 2].

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 [1], 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 поврежденности, 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 основой сильной неравновесности процесса разрушения и эволюции материала; отсутствию периодичности автокаталитического процесса, что обеспечивает одностороннюю эволюцию материала.

Рассмотрим некоторые общие аспекты теории динамических систем с поврежденностью 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 [1], 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 поврежденность  $\Delta\rho$ ). 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.

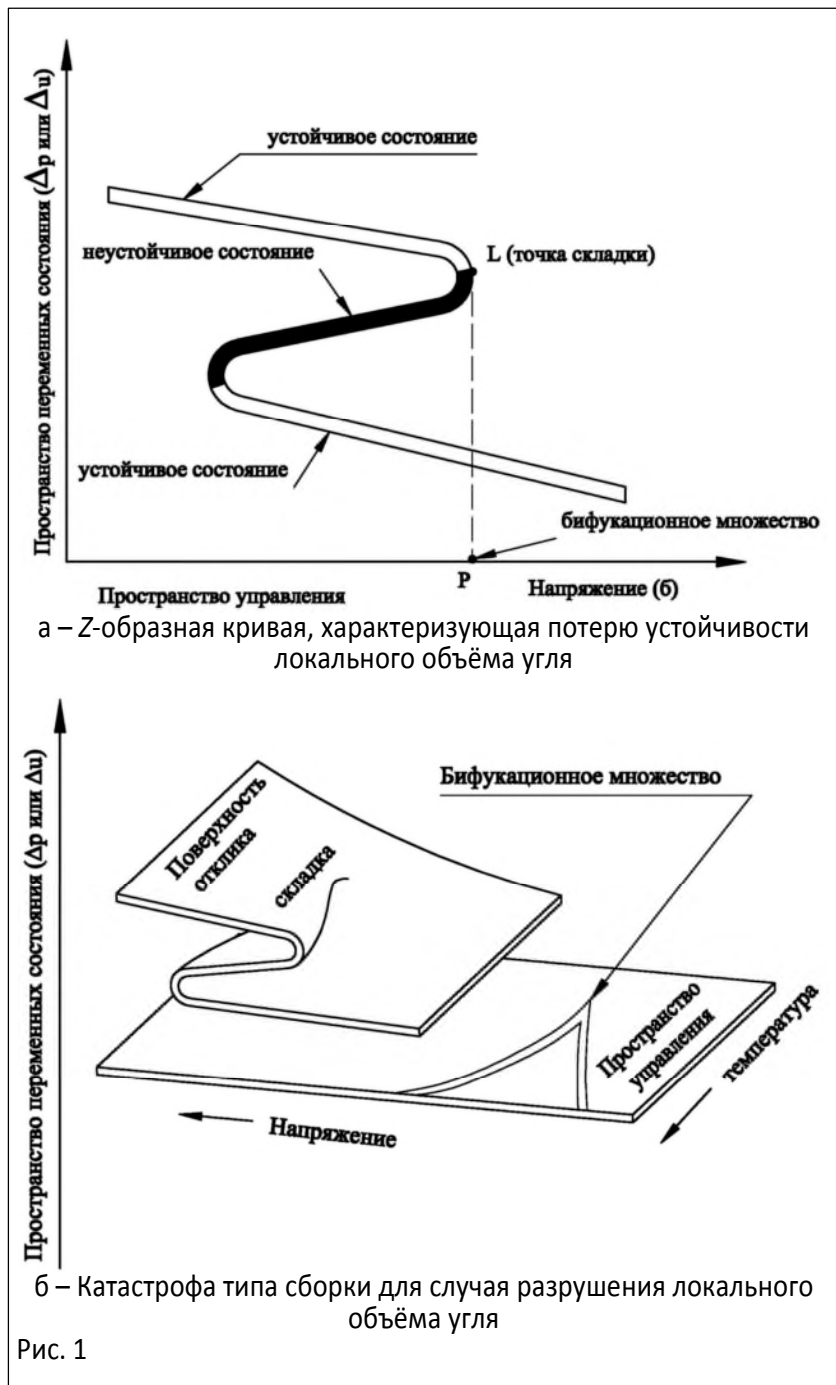
Таким образом, кинетика разрушения ГДЯ во времени может проходить через ряд последовательных бифуркаций.

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 един-

ство 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 поврежденности, 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 эволюционных





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

Используя концепции термодинамики необратимых процессов и приведенную 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 объем 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 опре-

делёнными 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 объем 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 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 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.

#### **4.5 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 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 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 существенен: 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.

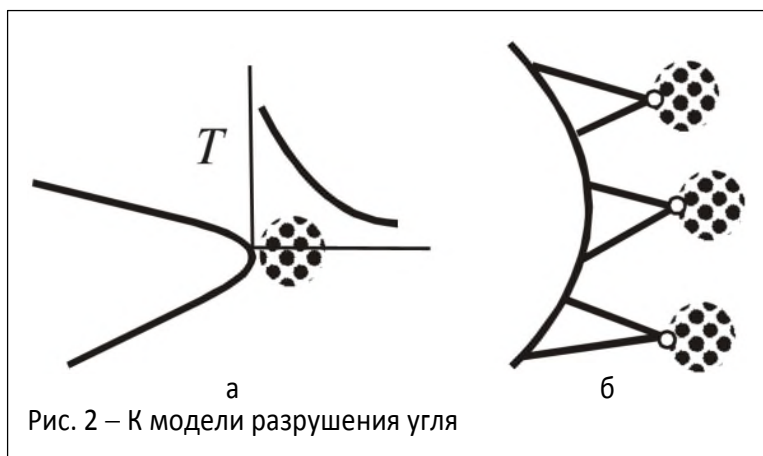


Рис. 2 – К модели разрушения угля

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 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 нетронутым угольным 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.

#### **4.6 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.

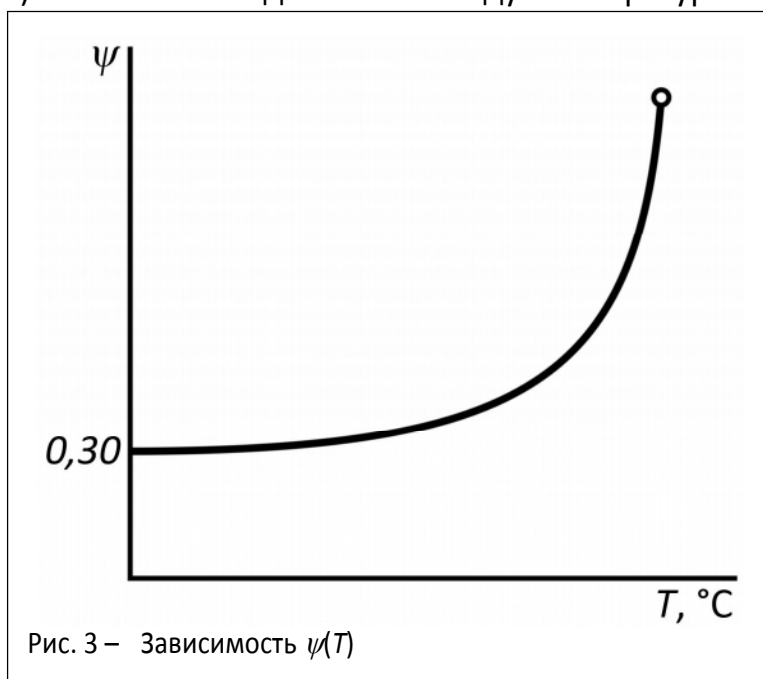
Принимая эти положения модель газодинамических явлений можно представить в следующем виде.

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 допустимые 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 [16, 17].

Если теплообмен в системе идёт быстрее, чем тепло-



обмен с окружающим пространством (например, с угольным массивом) используется критерий Семёнова – 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):

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

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>;  
 $V$  – объем 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. Семёнова, 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

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

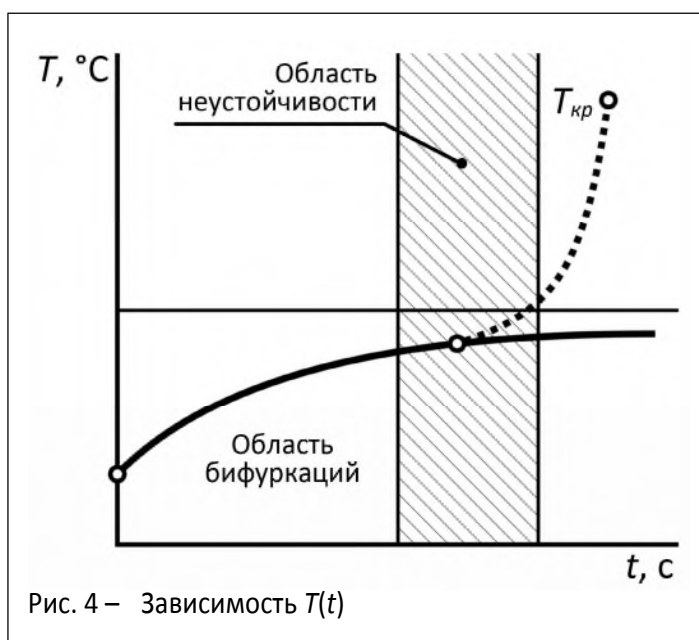


Рис. 4 – Зависимость  $T(t)$

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 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.

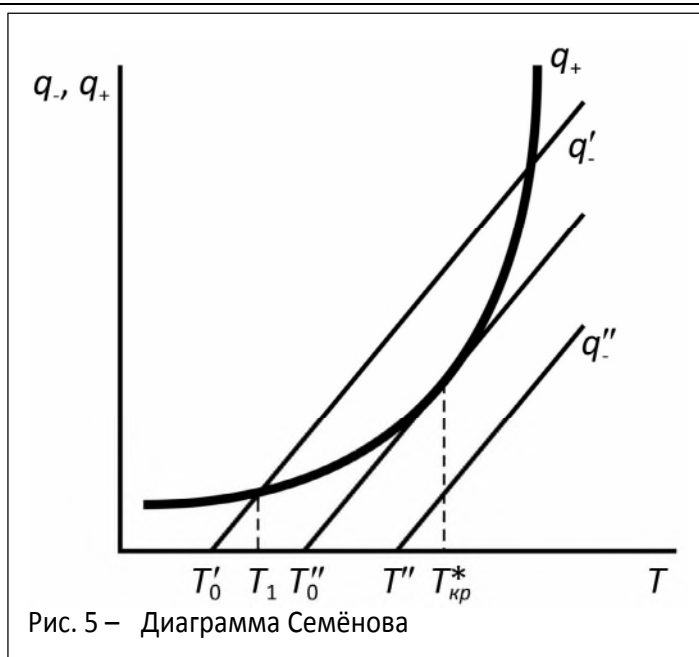


Рис. 5 – Диаграмма Семёнова

Критическое условие определяется касанием линий и выражается критерием Семенова.

## 5 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 образовавшего 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 опас-



ности (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 [18] 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.

## 6 Некоторые важные предпосылки

**1. Температура в очаге опасности ГДЯ.** При объёмном сжатии образцов угля Малинникова О.Н. [8] 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 [1]). 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  $600\text{-}800^\circ\text{C}$ ; 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 °С). По мнению Н.Н. Семенова [16] 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 [27] 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. [26], 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 Фейхенбау-

му (в науке о турбулентности известна его постоянная  $\delta = 4,6692$ ). Известно также [2] 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.

## **6 Новизна работы**

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

6.2 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.

6.3 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.

6.4 Установлена особая роль температуры в локальном объёме угольного массива, вызванной экзотермическими эффектами в устьях движущихся микро-трещин. 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.

6.5 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 упругонаследственных сред: В 3-х томах. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягельский, А.С. Кобец. – Киев: Наук. думка, 2011. – 568 с.
2. Прикладная механика упругонаследственных сред: В 3-х томах. – Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягельский, А.С. Кобец. – Киев: Наук. думка, 2012. –

- 616 с.
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. – Киев: Наук. думка, 2010. – 423 с.
  5. Прогнозирование неустойчивости системы уголь-газ / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, В.Н. Чистоклетов. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (донецкое отделение), 2010. – 343 с.
  6. Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа / ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: Недра, 1978. – 164 с.
  7. Шевелёв, Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелёв. – Киев: Наук. думка, 1989. – 160 с.
  8. 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.
  9. Скочинский, А.А. Рудничная атмосфера / А.А. Скочинский. – М.: ОНТИ, 1932. – 151 с.
  10. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр / К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов, Ю.П. Галченко, В.Н. Одинцев // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76, № 4. – С. 318-332.
  11. Грицко, Г. Внезапные выбросы метана в шахтах / Г. Грицко // Наука в Сибири. Еженедельная газета СО РАН. – 2007. – № 32-33 (2617–2618) от 23.08.2007. – 6 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sbras.ru/HBC/article.phtml>. – Загл. с экрана.
  12. Грицко, Г. Внезапны ли внезапные выбросы и взрывы в угольных шахтах / Г. Грицко // Наука в Сибири. Еженедельная газета СО РАН. – 2012. – № 32-33 (2867–2868) от 23.08.2012. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sbras.ru/HBC/article.phtml>. – Загл. с экрана.
  13. Зборщик, М.П. О роли механоэмиссии в механизме газодинамических явлений / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1985. – № 1. – С. 32-34.
  14. О целесообразности использования некоторых показателей выбросоопасности / Б.В. Бокий, П.Е. Филимонов, С.Г. Ирисов // Уголь Украины. – 2011. – № 11. – С. 25-29.
  15. Зборщик, М.П. Тектонофизическая природа газодинамических явлений при разработке пологих пластов / М.П. Зборщик, В.И. Пилюгин // Уголь Украины. – 2010. – № 11. – С. 8-11.
  16. Семёнов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н.Н. Семёнов // Успехи физических наук. – 1940. – Т. XXIII, Вып. 3. – С. 251-292.
  17. Мержанов, А.Г. Современное состояние теории теплового взрыва / А.Г. Мержанов, Ф.И. Дубовицкий // Успехи химии. – 1966. – Т. XXXV, Вып. 4. – С. 656-683.
  18. Макаров, П.В. Самоорганизованная критичность деформируемых твёрдых тел и сред и особенности формирования очагов разрушения / П.В. Макаров // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXII Международной научн. школы им. акад. С.А. Христиановича. – Крым, Алушта, 17-23 сентября 2012 г. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. – С. 219-222.
  19. Фельдман, Э.П. Температурный режим угольного пласта / Э.П. Фельдман, И.Г. Старикова // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXII Международ. научн. школы им. акад. С.А. Христиановича. – Крым, Алушта, 17-23 сентября 2012 г. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. – С. 340-342.
  20. Фейт, Г.Н. Предельное напряжённое состояние и процессы разрушения трещиноватых газоносных угольных пластов / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXII Международ. научн. школы им. акад. С.А. Христиановича. – Крым, Алушта, 17-23 сентября 2012 г. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. – С. 335- .
  21. Баранов В.А. Структурні перетворення пісковиків Донбасу і прогноз їх викидонебезпечності: Автореф. дис. ... д-ра геологічних наук: 04.00.16 / НГАУ МОН України. – Дніпропетровськ, 2000. – 34 с.
  22. Отчет о деятельности научного совета РАН и краткие результаты научно-исследовательских работ учреждений и организаций горного профиля РФ и стран СНГ в 2011 г. – Москва, 2012. – С. 301.
  23. Ходот, В.В. Внезапные выбросы угля и газа / В.В. Ходот. – М.: ГНТИ, 1961. – 363 с.
  24. Петухов, И.М. Теоретические основы борьбы с выбросами угля, породы и газа / И.М. Петухов, А.М. Линьков // Уголь. – 1975. – № 9. – С. 9-15.
  25. Христианович, С.А. Механика сплошной среды: Избранные работы / С.А. Христианович; отв. ред. А.Ю. Ишлинский и Г.И. Баренблат. – М.: Наука, 1981. – 493 с.
  26. Трубецков, Д.И. Турбулентность и деформированный хаос / Д.И. Трубецков // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 1. – С. 77-86.
  27. 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.

---

**Об авторах**

**Булат Анатолий Федорович**, Академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru

**Дырда Виталий Илларионович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@mail.ru

---

**About the authors**

**Bulat Anatoly Fedorovich**, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

**Dyrda Vitaly Illarionovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@mail.ru

---

УДК 621.001.25

В.И. Дырда, д-р техн. наук, профессор  
(ИГТМ НАН Украины),

И.А. Воловик, канд. эконом. наук, доцент  
(ДГАУ)

## БИОСФЕРНО-НООСФЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ В. ВЕРНАДСКОГО В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

**Аннотация.** Рассматривается биосферно-ноосферная концепция эволюции биосферы в контексте устойчивого развития.

**Ключевые слова:** биосфера, ноосфера, живое и косное вещество, историческое время, геологическое время

V.I. Dyrda, D. Sc. (Tech.), Professor  
(IGTM NAS of Ukraine),

I.A. Volovik, Ph. D. (Econom.), Associate Professor  
(DSAU)

## VERNADSKY BIOSPHERE-NOOSPHERE CONCEPT IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Abstract.** Biosphere-noosphere concept of biosphere evolution is considered in the context of sustainable development.

**Keywords:** biosphere, noosphere, living and inert substance, historical time, geological time

На рубеже тысячелетий к проблеме устойчивого развития обращались многие учёные самых различных отраслей науки. Достаточно назвать работы Одум Ю., Реймерса Н.Ф., Легасова В., Осипова В.И., Д.Г. и Д.Л. Медоузов, Моисеева Н.Н., Данилова-Данильяна В.И., Киселёва М.М., Крымского С.Б., Качинского А.Б. и многих других, чтобы составить некоторые представления о широте и важности этой проблемы. Во всех этих исследованиях преобладали экологические аспекты, нередко подаваемые в религиозно-философском контексте. Проблемам же науки, научной мысли как продукта человеческой деятельности, роли человека в создании искусственной среды обитания – техносферы, уделялось совершенно недостаточно внимания.