

МЕХАНИЗМ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

И.Е. Колесниченко¹, Е.А. Колесниченко¹, Е.И. Любомищенко¹, Е.И. Колесниченко¹

¹ Автодорожный институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Шахты, Россия, e-mail: kolosnichenko_igor@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема предотвращения внезапных выбросов метана и угля, обеспечению метанобезопасности при разработке угольных пластов. Приведены масштабы распространения внезапных выбросов на шахтах России и за рубежом. Показано, что на первых этапах изучения были выделены три горно-геологических фактора. На практике оказалось, что характеристика угольных пластов отличается разнообразием. Дана характеристика исследований молекулярной структуры угля. Однако теоретические модели выполнены на уровне схематического представления. По результатам экспериментального изучения с увеличением от $6 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ раз представляется возможным определять параметры надмолекулярной структуры угля. Приведен анализ результатов современных исследователей Китая и России. Особенностью исследований является отсутствие учета молекулярной структуры угля и энергетических процессов в угольных пластах. Приведены цель, задачи и методы исследования. Приведено обоснование закономерностей формирования различных характеристик угля. Показано, что основным фактором, влияющим на свойства угля, являются химические свойства воды. В воде с кислотными и щелочными свойствами синтезируются макромолекулы с различным набором ароматических ядер и функциональных групп. В периоды метаморфических преобразований молекулярная структура угля сохранялась, но высокая природная метаноносность приурочена к щелочным фациальным условиям. Приведена характеристика выбросоопасной зоны в пласте. Приведена концепция внутренней тепловой энергии атомов. Показано, что внезапный выброс необходимо рассматривать как совокупность энергетических процессов в пласте. Для описания этих процессов впервые приняты закономерности квантовой теории. Все процессы в изолированном геологическом теле происходили под воздействием электромагнитных излучений атомов органического материала. Механизм внезапного выброса состоит из двух процессов. Первый процесс начинается при увеличении опорного горного давления и деформаций пласта. Второй процесс энергетический, и происходит в молекулярной структуре пласта. При силовом воздействии для отделения атома от молекулы требуется в 2 раза меньше энергии. При увеличении электромагнитной энергии, испускаемой атомами, увеличивается массовое количество и кинетическая энергия метана, его температура и давление в пласте, возрастает вероятность внезапного выброса в выработку. Приведены научные и практические рекомендации.

Ключевые слова: внезапный выброс, атомы, электромагнитные волны, фотон, метан, электроны, энергетические уровни, передача тепловой энергии, электронные орбитали, физико-химические процессы, метаморфизм.

Для цитирования: Колесниченко И. Е., Колесниченко Е. А., Любомищенко Е. И., Колесниченко Е. И. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С. 108–120. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120.

Mechanism of methane outbursting in coal seams

I.E. Kolesnichenko¹, E.A. Kolesnichenko¹, E.I. Lyubomishchenko¹, E.I. Kolesnichenko¹

¹ Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Shakhty, Russia, e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru

Abstract: The article addresses the problem connected with prevention of coal and methane outbursts and methane safety of coal mining. The scale of outbursting in mines in Russia and abroad is described. The early studies of the problem revealed three mining-and-geological factors. In actual practice, it appeared that coal seams featured variety. The investigations into the molecular structure of coal are characterized. The theoretical modeling turns out to be schematic. The experimental results allow determining parameters of supermolecular structure of coal at magnification from $6 \cdot 10^4$ to $2 \cdot 10^5$ times. The advanced research findings of scientists from China and Russia are analyzed. These studies neglect molecular structure of coal and energy processes in coal seams. The goal, objectives and methods of the present research are set forth. The mechanisms of different characteristics of coal are justified. It is shown that the key factor influence coal properties are the chemical properties of water. In water with acidic properties and alkalinity, macromolecules with different sets of aromatic rings and functional groups are synthesized. In the periods of metamorphic transformations, the molecular structure of coal was preserved, while high natural methane content is associated with alkaline environmental conditions. An outburst-hazardous coal seam zone is characterized. The concept of the internal thermal energy of atoms is presented. It is shown that an outburst should be considered as a set of energy processes in a coal seam. These processes are for the first time described using the quantum theory laws. All processes in an isolated geological body took place under the action of the atomic electromagnetic radiation of the organic material. The mechanism of an outburst is composed of two processes. The first process begins when abutment pressure and strains increase in a seam. The second—energy—process occurs in the molecular structure of the seam. The force impact needs half as much energy to separate atoms from molecules. As the electromagnetic energy emanated by atoms grows, the bulk quantity and the kinetic energy of methane, as well as its temperature and the pressure in the seam increase, thus, probability of an outburst builds up. The theoretical and practical recommendations are given.

Key words: outburst, atoms, electromagnetic waves, photon, methane, electrons, energy levels, thermal energy transmission, electron orbital, physicochemical processes, metamorphism.

For citation: Kolesnichenko I. E., Kolesnichenko E. A., Lyubomishchenko E. I., Kolesnichenko E. I. Mechanism of methane outbursting in coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(1):108-120. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120.

Введение

Количество внезапных выбросов метана на шахтах значительно уменьшилось в результате закрытия многих опасных шахт за рубежом и в России. Однако риск внезапного выброса метана во время подземной добычи угля остается. Причина заключается в том, что несмотря на обширные исследования, проведенные в последние 150 лет, физические

механизмы, вызывающие выбросы угля, до сих пор плохо изучены. Внезапные выбросы метана и угля относятся к наиболее опасным динамическим явлениям, которые происходят в забоях очистных и подготовительных выработок во время различных технологических процессов в присутствии рабочих. Первый внезапный выброс был зафиксирован в 1834 г. С тех пор во всех угледобывающих стра-

нах произошли тысячи выбросов [1]. В КНР произошло около 1/3 всех внезапных выбросов мира. В шахтах КНР на 1 января 1990 г. зарегистрировано 12 956 выбросов. Один из крупных выбросов (1500 т угля, 95 000 м³ метана) произошел через 18 мин после сотрясающего взрывания. На шахтах Бельгии с 1847 г. произошло 474 выброса. Значительное количество внезапных выбросов произошло на шахтах Великобритании, Венгрии, Канады, Польши и др. В России выбросы были на шахтах, разрабатывающих метаноносные угольные пласты Донбасса, Кузбасса, на о. Сахалин. На шахтах Воркутского месторождения произошло 267 внезапных выбросов [1].

Тяжесть происходящих аварий вызывает нерешенность проблемы обеспечения безопасности рабочих. Трудность ее решения заключается в непредсказуемости мест и объемов внезапных выбросов. Выбросы происходят не на всех пластах и не во всех забоях, а в локальных местах угольных пластов и внезапно. Чтобы изучить механизм реализации внезапного выброса, необходимо прежде всего научиться прогнозировать места будущих выбросов. Там, где выброс не должен происходить, механизм реализации не изучишь.

Первые гипотезы внезапных выбросов были сформулированы при изучении характеристик угольных пластов на месте произошедших выбросов. В 1910 г. Stassart и Lemair считали, что внезапные выбросы приурочены к геологическим нарушениям и повышенным остаточным напряжениям, под действием которых уголь в пластах был препарирован. В России Н.Н. Черницын (1917) выделил в совокупности два фактора, влияющих на образование выброса: повышенное горное давление на пласт и повышенное давление метана в пласте.

В 1952 г. В.В. Ходот как химик добавил к этим факторам такие физико-меха-

нические свойства угля, как прочность при дроблении и сопротивление одноосному сжатию [2]. Практика показала, что гипотеза В.В. Ходота о влиянии этих факторов верна, но не позволяет прогнозировать опасные участки в угольных пластах и не объясняет механизм внезапного выброса. В.И. Николин зональную выбросоопасность объяснял неравномерностью природной газоносности пластов. Однако эти интуитивные предположения не были научно обоснованы.

Фактические данные показывали, что геологическая характеристика угольных пластов в местах внезапных выбросов отличается разнообразием. Выбросы происходили на различной глубине от поверхности. Мощность и выход летучих веществ в местах выброса варьировались в широком диапазоне. Аналогичное разнообразие геологических условий при внезапных выбросах наблюдалось на угольных месторождениях России.

Опыт наблюдений подтвердил, что внезапные выбросы в основном происходили из непрочных угольных слоев в угольных пластах. Образование таких непрочных слоев было обосновано М.Д. Залеским [3] и И.Э. Вальц [4]. Другие авторы также указывали на опасность выбросов метана на участках с такими слоями. Однако исследователи не смогли определить геологические, физические или химические характеристики для достоверного прогнозирования таких выбросоопасных участков.

Известны два направления исследования молекулярной структуры с целью выявления особенностей выбросоопасного угля: теоретические и с применением различных физических приборов. Виртуальные представления о структуре модели макромолекулы угля были предложены Д. Ван-Клевеленом, В.В. Ходотом, А.В. Артемовым, Г.Д. Фролковым и др. [1]. Однако эти модели выполнены на уровне схематического представления хими-

ческой структуры. Значительные успехи в экспериментальном изучении микроструктурных свойств угольного вещества, принадлежащие ИПКОН АН СССР, были достигнуты А.Т. Айруни [5]. Видны закрытые и проходные поры между агрегатами макромолекул. По фотографиям частиц угля с увеличением от 60 000 до 200 000 раз можно с относительной точностью измерить параметры ламелей и агрегатов макромолекул.

Достоинство этих результатов заключается в реальном изучении параметров надмолекулярной структуры угольного вещества. Однако отличительные признаки выбросоопасного угля не были выявлены.

На современном уровне продолжается изучение угольных пластов. Китайские ученые Т. Хиа и др. [6, 7] рассматривают с позиций геомеханики газопроницаемость и самонагревание угля, а также сорбцию и десорбцию метана. Э.П. Фельдман и др. [8] на термодинамической модели исследовали фильтрацию метана в угольном пласте. С авторами можно согласиться, что вмещающие породы передают пласту угля горное давление и этим поддерживают однородную температуру в пласте. Однако не обоснован источник образования такой температуры. Fenghua An и Yuanping Cheng [9] показали, что увеличение метана в пласте и тектонических напряжений приводит к накоплению потенциальной энергии для выброса. Такие выводы существуют уже давно. Заслуживает внимания вывод, что при увеличении газа и тектонических напряжений возможно разрушение угольной массы в угле. Но неясно, что такое потенциальная энергия, и как происходит процесс разрушения угля. В последние годы в Китае [10] и России [11, 12] активно обсуждается возможность нахождения метана в виде соединений газовых гидратов в угольном пласте. По нашему мнению, химиче-

ские процессы формирования газовых молекул во время метаморфизма угля неблагоприятны для создания таких соединений. Противоречиво утверждение Т. Хиа [13] о роли термодинамического эффекта в процессах взаимодействия угля и газа. Указывается, что изменение температуры и горного давления влияет на геомеханику угля и породы. Считаем, что это температура пласта зависит от горного давления.

Звуковые проявления в массиве подтверждены Hui Li [14] лабораторным моделированием выброса угля и газа в сочетании с акустико-эмиссионным анализом. При трехмерном сжатии образца угля происходит развитие микромасштабных трещин, которое сопровождалось звуковыми сигналами. Необходимо отметить работу Y. Luo и S. Li [15], в которой приведены результаты, частично совпадающие с нашими представлениями, сформулированными в 2000 г. [1, 16]. Отмечается, что молекулярная структура в пласте не изменяется, молекулы метана образуются в результате отделения атомов углерода С и водорода Н от макромолекул, при деформировании углей средней степени метаморфизма образуется новый метан, при этом концентрация алифатических групп уменьшается, что подтверждается замерами спектрометром Фурье (FTIR). Однако такие выводы не обосновываются физическими закономерностями. Не известен источник тепловой энергии физико-химических процессов в пласте.

Обзор технической литературы показал, что особенностью исследований является отсутствие представления о реальных угольных пластах. Угольный пласт рассматривается как однородный материал, имеющий постоянные структурно-механические свойства. Исследуются формы нахождения метана без учета химической структуры пласта. Моделируются способы изменения проницаемости и

пористости угля в массиве. Применяемые методы исследования не содержат фундаментальных основ для достоверного прогнозирования местонахождения и механизма выбросоопасных участков в угольных пластах [17].

По мнению авторов этой статьи, локальное место вероятного выброса характеризуется генетической особенностью молекулярной структуры органической части угля и повышенным горным давлением по сравнению с окружающим массивом пласта на эту локальную зону [16]. Механизм внезапного выброса заключается в физических процессах увеличения массовой концентрации и потенциальной энергии метана, которые происходят в результате реакции молекулярной структуры угля на усиление внешнего механического воздействия на пласт.

Цель исследования состояла в обосновании энергетических закономерностей инициирования и реализации механизма газодинамического процесса внезапного выброса метана и угля в рабочее пространство выработки.

Задачи исследования

Первоочередной задачей было доказать закономерности изменения структурно-молекулярного строения торфяников и современных метаморфизованных пластов; что величина аномальной природной метаноносности по простиранию и по мощности пласта зависит от фациальных условий накопления торфяника; внезапные выбросы происходят на участках с аномальной метаноносностью. Второй задачей было доказать, что все физико-химические процессы в угольном пласте, в том числе и процессы механизма внезапного выброса происходят под воздействием внутренней тепловой энергии, которую излучают все атомы молекулярной структуры органической части угольных пластов.

Методы исследования

Методы включали изучение физико-химических свойств торфяников, геологических закономерностей формирования угольных пластов, характеристик метаморфизованного угля. Шахтные замеры были выполнены на шахте «Комсомольская» АО «Воркутауголь». При вымывании передовых скважин по угольному пласту «Мощный» происходили внезапные микровыбросы метана и угля; по планам горных выработок и геологическим разрезам были изучены геологические условия, в которых произошли 267 внезапных выбросов на шахтах Воркутского месторождения.

Теоретические методы включали разработку гипотезы, аналитические расчеты с применением основных закономерностей общей физики и основных аксиом квантовой теории. В исследованиях впервые все процессы рассматривались с позиции квантовой теории, аксиомы которой разработаны авторами [18].

Обоснование молекулярной структуры угля

Процесс накопления торфяника на площади его распространения происходил в течение длительного геологического периода. Материал торфяника состоял из целлюлозы и гемицеллюлозы, лигнина, жиров и воска, белков и их производных, а также минеральных составных частей. Химический состав этого органического материала известен. Целлюлоза представляет собой клетчатку-полисахарид состава $[C_6H_{10}O_5]_n$ с молекулярной массой 80 000–150 000. Длина молекулы целлюлозы достигает 400–800 нм при поперечном размере 0,3–0,75 нм. Гемицеллюлоза имеет сходное с целлюлозой строение $C_5H_8O_4$. Лигнин заполняет межклеточное пространство высших растений. Лигнин представляет собой ароматические ядра, образованные из нескольких бензольных колец, и функ-

циональные группы. Формулы лигнина $C_{50}H_{49}O_{11}$. Таким образом, принимаем, что химическая структура торфяника — это комплекс макромолекул, состоящих в основном из химических элементов углерода, водорода и кислорода.

Различные слои торфяника и породные пропластки образовывались в результате колебательных движений земной коры. Слоевая структура торфяника формировалась во время трансгрессивных и регрессивных изменений уровня грунтовой воды. В зависимости от этого происходило анаэробное или аэробное разложение растительного материала. Российскими углепетрографами М.Д. Залесским [3], А.А. Любером [19], И.Э. Вальц [4] и др. было установлено, что в торфогенном слое в анаэробных условиях при коллоидном разложении образовывались витринитовые (гелифицированные) микрокомпоненты, а в аэробных на поверхности происходила фюзенизация (обугливание) материала. Д.В. Наливкин [20] и В.Е. Хаин [21] доказали, что на формирование структуры торфяника оказывали влияние фациальные условия, отражающие одинаковые физико-географические и геотектонические условия образования осадка.

Е.А. Колесниченко установил, что основным признаком, существенно различающим фациальные условия, являются химические свойства воды. В воде с кислотными и щелочными свойствами макромолекулы органических веществ торфяника разрушались не одинаково. В результате синтезируемые молекулы в этих средах отличаются набором и количеством ароматических ядер и функциональных (боковых) групп. Из квантовой физики вытекает физическая основа теории строения вещества: в одних и тех же условиях из одних и тех же атомов всегда образуется одно и то же вещество с одинаковой структурой. Однако при изменении условий синтеза из одного и

того же состава образуется большое количество вариантов структуры этого вещества. Выполненные авторами расчеты вариантов разложения растительного материала позволили смоделировать химические структуры макромолекул [16].

После погружения торфяника на глубину и перекрытия минеральными пластами кровли он приобрел форму пласта, в котором продолжались структурно-молекулярные изменения, называемые процессами углефикации и метаморфизма. В молекулярной структуре после образования молекул метана, воды, углекислого газа и др. происходило постепенное уменьшение количества атомов водорода и углерода. В таблице показаны фактические изменения концентрации атомов в сухой беззольной массе в угле на различных уровнях метаморфизма.

Анализ химических реакций с применением закономерностей общей и коллоидной химии показал, что в кислой среде большое количество жиров и восков в боковых группах разрушается, и макромолекулы располагаются ближе друг к другу. Такая форма с короткими боковыми группами обеспечивает плотную упаковку и сшивку макромолекул. В щелочной среде молекулы лигнина могут терять часть бензольных колец, но молекулы белков и жиров стремятся выпрямиться, и поэтому боковые ответвления от основной цепи ароматических ядер будут иметь большую длину, затрудняя сшивку.

При такой разветвленной изомерии молекул формируется рыхлая структура угля с большой пористостью и низкими физико-механическими свойствами.

С точки зрения технологических работ метаноопасность оценивается в массовых объемах метана в пласте. Метан находится в порах угля под давлением. Опасность заключается в том, что до и после выемки угля никому не известны достоверные данные о пористости, про-

Содержание относительной массовой концентрации химических элементов в зависимости от вида угля в пласте
Mass concentration ratio of chemical elements depending on the type of coal in a seam

Виды угля	Массовая концентрация химических элементов в угле, %			
	углерод, C ^{daf}	водород, H ^{daf}	кислород, O ^{daf}	азот, N ^{daf}
Торф	48–65	4,7–7,3	25–45	0,6–2,5
Бурый	63–75	4,5–5,5	18–30	0,5–1,5
Каменный	75–93	4,0–6,0	3–19	до 2,7
Антрацит	90–98	1,0–3,0	1–8	до 1,0

нищаемости угля в пласте и массовой концентрации метана. Данные о метаноносности носят вероятностный характер, так как определяются в результате обработки проб угля, взятых керногазосборниками из пробуренных скважин в пласте. Такие точечные данные о метаноносности нереально распространять на пласт даже в пределах выемочного участка, что и доказывает внезапность выбросов метана.

Органическая часть угольного пласта состоит из микрокомпонентов и ингредиентов, которые содержат группы витринита и фюзинита. Как показано выше, такой структурно-вещественный состав состоит из химических элементов наземной растительности и не изменился в результате физико-химических преобразований на стадиях метаморфизма. Макромолекулы могли измениться, но атомы, из которых они состоят, не исчезают.

Выполненные исследования позволяют сформулировать характеристику выбросоопасной зоны. Это генетически обособленный метаноносный участок угольного слоя или пласта, в границах которого в период торфонакопления в определенных фациально-геотектонических условиях сформировалось угольное вещество с аномальной молекулярной структурой, которая в процессе гумификации и углефикации не претерпела значительных перестроений энергетических связей.

Особенность этой зоны состоит в том, что в период метаморфизма в пласте

при частичном разложении макромолекул образовалась аномальная массовая концентрация метана, которая находится под значительным статическим давлением. Оставшиеся части макромолекул содержат боковые группы, из которых при увеличении тепловой энергии могут дополнительно формироваться молекулы метана [16].

Реальный газ метан находится в макромолекулярных порах, которые образуются в результате отделения атомов углерода и водорода. По расчетам пористость такой макромолекулы составляет в среднем 25,4% от занимаемого объема. Скопившиеся в свободных пространствах молекулы метана не могут находиться вплотную друг к другу. Они принимают равновесное состояние на определенном расстоянии одна от другой. Объем одной молекулы 0,0736 нм³. Термодинамическое состояние газа характеризуется температурой, давлением и занимаемым объемом. Температура метана соответствует окружающей массе угля. Объем пор можно только предположить. Например, плотность угля марки антрацит составляет 1650 кг/м³. Плотность коксующихся метаноносных марок угля с высоким показателем летучих веществ — около 1250 кг/м³. Получается, что у коксующихся марок по сравнению с антрацитом суммарная пористость составляет 0,24 м³. По нашим расчетам, в таком объеме может сохраняться в свободной форме до 45 м³ метана.

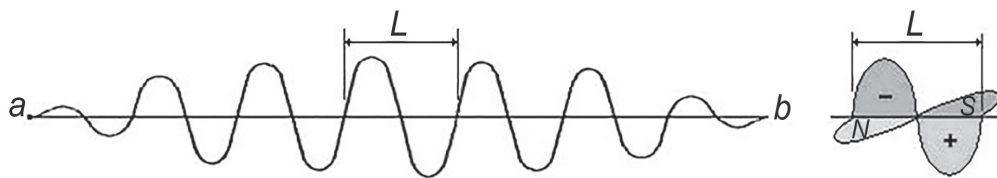


Рис. 1. Схема фотона энергии: ab — фотон энергии; L — длина волны кванта энергии
 Fig. 1. Energy photon scheme: ab —energy photon; L —wavelength of energy quantum

Концепция внутренней тепловой энергии атомов

Энергетической основой механизма внезапного выброса метана и угля впервые приняты фундаментальные закономерности квантовой теории. Рассматривая внезапный выброс как совокупность энергетических процессов в пласте, возникла необходимость определить инициирующий источник энергии. Научной областью квантовой физики и квантовой теории являются законы образования и излучения электромагнитной энергии в молекулярной среде.

Каждая молекула обладает внутренней потенциальной и кинетической энергией. Атомы поглощают и испускают тепловую энергию электромагнитным излучением в виде фотонов. Фотон состоит из целого числа квантов. Энергия кванта h равна постоянной Планка и равна $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, или $4,1361 \cdot 10^{-15}$ эВ · с (рис. 1).

Энергия фотона зависит от частоты электромагнитного излучения и равна произведению энергии одного кванта на частоту электромагнитной волны. Электроны атома вращаются вокруг атомного ядра только на разрешенных уровнях и подуровнях. Так, уровни $n = 1, 2, 3$ состоят из множества подуровней 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, и т.д. (рис. 2). Орбиталь $n = 1$ соответствует основному энергетическому уровню с максимальной энергией. При нахождении электрона на этом уровне атом имеет наименьшую кинетическую энергию и скорость вращения на орбитали. Электрон может находиться на любом энергетическом уровне.

Все атомы любого вещества постоянно поглощают фотоны энергии от других атомов. При поглощении фотона электрон возбуждается и перескакивает на один из уровней возбужденного состояния с более высокой энергией.

Например, получив фотон с определенной частотой и энергией E , электрон перескакивает с уровня $2n$ на возбужденный $3n$. Продолжительность пребывания электрона на уровне возбужденного состояния порядка 10^{-8} с. После этого электрон перескакивает на энергетический уровень ближе к ядру и испускает фотон энергии в инфракрасном диапазоне, величина которой равна разности энергия на уровнях $3n$ и $2n$. На этом уровне электрон может находиться порядка 10^{-3} с.

Электроны в атомах могут находиться в стационарных энергетических состоя-

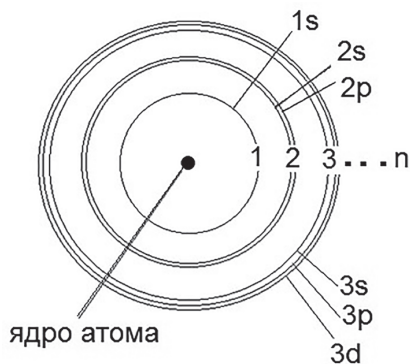


Рис. 2. Схема разрешенных энергетических орбиталей атома водорода: 1n, 2n, 3n — разрешенные уровни; 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d — подуровни орбиталей

Fig. 2. Scheme of permissive energy orbitals of hydrogen atom: 1n, 2n—permissive levels; 1s, 2s—sublevels of orbitals

ниях, не излучая и не поглощая энергию. При получении максимальной энергии электрон перескакивает на возбужденный, самый дальний от ядра уровень энергии. Если атом находился в химической связи с другим атомом, то эта связь становится минимальной и атом становится свободным радикалом.

Кинетическая теория объясняет внутреннюю температуру вещества и изменение этой температуры. При изменении энергии поглощаемых и испускаемых фотонов изменяется температура вещества. В соответствии с молекулярным строением угольного пласта можно утверждать, что для описания всех структурно-химических изменений в торфянике и угольном пласте можно применять закономерности квантовой теории (квантовой физики). Все процессы в изолированном геологическом теле происходили под воздействием электромагнитных излучений атомов органического материала.

Процессы внезапного выброса

В начальном состоянии напряженное состояние угольного пласта соответствует давлению вышележащих пород. В порах угольного пласта имеется метан в свободном состоянии. Статическое давление метана соответствует плотности в замкнутом пространстве и температуре угольного пласта.

Механизм внезапного выброса состоит из двух процессов. Первый процесс начинается с увеличения статического или динамического опорного давления на пласт при приближении к выработке или выработанному пространству. Величина этого давления в короткий срок может увеличиться до 6—8 раз по сравнению с первоначальной величиной. В угольном пласте в опорной зоне повышается напряженное состояние, происходит деформация пласта.

Второй процесс энергетический и происходит в угольном пласте. При силовом

воздействии для отделения атома от молекулы требуется в 2 раза меньше энергии. Стандартная энергия, при которой происходит разрыв химических связей, известна по ИК-спектрограммам. При одинарной связи разрыв между атомами углерода энергия равна 348 кДж/моль, при двойной связи — 611 кДж/моль, при отделении атома водорода от углерода — 412 кДж/моль, водорода от кислорода — 462 кДж/моль (рис. 1). При достижении такой энергии начинается процесс отделения атомов от макромолекул и образование молекул газов CH_4 , CO_2 и H_2O с выделением дополнительной энергии. В результате массовое количество метана в угле увеличивается. Увеличивается кинетическая энергия и давление газов, повышается температура в порах, происходит разрушение метаном микроструктуры угольной массы на отдельные фрагменты агрегатов, ламелей и фибриллярных структур. Происходит частичное разрушение угля, объединение и увеличение объемов метана под давлением.

Известны два вида внезапных выбросов метана и угля. Первый вид проявляется при выбросе с большой кинетической силой метана и разрушенного угля через природную или образовавшуюся трещину. Длина такой трещины по шахтным замерам не превышает 5—8 м, так как опорное горное давление формируется на небольшом расстоянии от забоя. После выброса остается пустота причудливой формы, без повреждения верхнего и нижнего слоев пласта. Второй вид проявляется при силовом отжиме слоя пласта шириной 2—3 м и длиной до 10—15 м в выработку, а затем выносом до 50 т разрушенного угля из-за отжатого слоя. На практике значительный объем выброшенной массы состоит из тонкодисперсной угольной пыли, известной как «бешеная мука». Температура выброшенного угля выше, чем в массиве пласта.

Практический анализ высооопасных зон

Результаты анализа 267 внезапных выбросов на шахтах Воркутского месторождения, разрабатывающих пласты «Мощный», «Тройной», «Двойной» показали, что все выбросы произошли на глубине, соответствующей нескольким уровням изогипсов. На шахте «Комсомольская» произошло 37 выбросов. При этом на изогипсе —276 м произошел 21 выброс, а на изогипсе —269 м — 11 выбросов метана. Все выбросы произошли из мягких слоев сажистого угля, который был образован в период торфонакопления и при расслоении более прочных пачек пласта.

Для предотвращения внезапного выброса во время проведения подготовительного штрека 1321-С по высокоопасному пласту «Мощный» производили в подготовительную смену гидровывание серии опережающих полостей по высокоопасному слою мощностью 0,23 м. Длина средней полости 20 м, остальных полостей — 15 м. Призабойная часть пласта была дегазирована предыдущей серией передовых полостей на расстоянии от 6 до 10,5 м от забоя. Во время вымывания новой серии за дегазированной частью пласта начиналось активное выделение метана, происходили удары в массиве и примерно через 2 м — внезапные микровыбросы. Тонкодисперсная пыль массой в несколько килограммов выбрасывалась на расстояние до 12 м от забоя выработки. Во время ударов происходила посадка кровли. Иногда

да во время силового удара на расстоянии до 20 м от забоя срезало болты на хомутах арочного крепления выработки.

Заключение

Предложена концепция механизма внезапного выброса из двух процессов. Первый — геодинамический процесс — проявляется в зоне опорного давления и заключается в повышении силового воздействия на молекулярную структуру угольного пласта. Второй процесс — энергетический — происходит при увеличении тепловой энергии, испускаемой атомами угля. Происходит образование новых молекул метана и повышение его давления. Внезапный выброс проявляется в пласте или отдельном слое, в котором сосредоточена аномальная метаносность.

Полученные закономерности дают научную базу для идентификации высокоопасных зон с аномальной природной метаносностью и решения проблемы предотвращения внезапных выбросов.

Научная новизна заключается в обосновании новых природных закономерностей образования при торфонакоплении и изменении в геологический период метаморфизма молекулярной структуры угольных пластов с аномальной метаносностью. Представленные результаты могут быть использованы при изучении метаносности пластов, форм нахождения метана в пласте, разработки способов предотвращения внезапных выбросов и способов повышения эффективности дегазации угольных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесниченко Е. А., Колесниченко И. Е. Внезапные выбросы и взрывы метана: прогнозирование и предотвращение. — Ростов-на-Дону: Изд-во «Логос», 2005. — 248 с.
2. Ходот В. В. Современные представления о природе и механизме внезапных выбросов угля и газа / Материалы совещания по внезапным выбросам угля и газа. — Углетехиздат, 1952.
3. Залесский М. Д. Очерк по вопросу образования угля. — Изд. Геол. Ком., 1914.
4. Вальц И. Э. Методика спорового анализа для целей синхронизации угольных пластов. — Гостоптехиздат, 1941.

5. Айруни А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. — М.: Наука, 1987. — 310 с.
6. Xia T., Wang X., Zhou F., Kang J., Liu J., Gao F. Evolution of coal self-heating processes in longwall gob areas // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015, Vol. 86, pp. 861–868. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2015.03.072.
7. Xia T., Zhou F., Gao F., Kang J., Liu J., Wang J. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams // International Journal of Coal Geology, 2015, Vol. 141–142, pp. 1–2. DOI: 10.1016/j.coal.2015.02.007.
8. Фельдман Э. П., Василенко Т. А., Калугина Н. А. Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 3. — С. 46–65.
9. Fenghua An, Yuanping Cheng The effect of a tectonic stress field on coal and gas outbursts // The Scientific World Journal. 2014, Vol. 2014, ID 813063, 10 p. DOI: 10.1155/2014/813063.
10. Ming-Min Yang, Dong Jik Kim, Marin Alexe Flexo-photovoltaic effect // Science. 2018, Vol. 360, Issue 6391, pp. 904–907.
11. Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Исмагилов З. Р., Ким Т. Л. Влияние разложения газовых гидратов на рост трещин в массиве угля впереди забоя подготовительной выработки // Известия вузов. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 96–103.
12. Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Исмаглов З. Р., Ким Т. Л., Манаков А. Ю. О влиянии форм связи с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — № 1. — С. 34–41.
13. Xia T. Role of thermodynamic effect on coal-gas interactions during underground pre- and post- mining coal seams in the environmental geology // J Environ Geol. 2017;1(1):7–8. DOI: 10.4172/2591-7641.1000003.
14. Hui Li, Zengchao Feng, Dong Zhao, Dong Duan Simulation Experiment and Acoustic Emission Study on Coal and Gas Outburst // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, Vol. 50, Issue 8, pp. 2193–2205.
15. Luo Y., Li S. Excess Coalbed Methane Production Mechanism in the Process of Coal Tectonic Deformation // Journal of Geoscience and Environment Protection, 2016, Vol. 4, pp. 175–178. DOI: 10.4236/gep.2016.47019.
16. Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Колесниченко И. Е. Внезапные выбросы метана: теоретические основы. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. — 232 с.
17. Колесниченко И. Е., Артемьев В. Б., Колесниченко Е. А.. Эволюция методов изучения метанобезопасности при разработке угольных пластов // Уголь. — 2019. — № 7(1120). — С. 36–41. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-36-41.
18. Колесниченко И. Е., Артемьев В. Б., Колесниченко Е. А., Черечукин В. Г., Любомищенко Е. И. Теория электронно-волновой физики угольных пластов // Горная промышленность. — 2018. — № 5. — С. 86–89.
19. Любер А. А. Типы превращения растительных тканей в ископаемый уголь // Химия твердого топлива. — 1934. — № 5.
20. Наливкин Д. В. Учение о фациях. — Георазведиздат, 1-е изд. 1932; 2-е изд. 1933, 3-е изд. АН СССР, 1956.
21. Хаин В. Е. О некоторых основных понятиях в учении о фациях и формациях // Бюлл. МОИП. Отд. геол. — 1950. — Т. 25. — № 6. — С. 3–28. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Kolesnichenko E. A., Kolesnichenko I. E. *Vnezapnye vybrosy i vzryvy metana: prognozirovaniye i predotvrashchenie* [Methane outbursts and explosions: prediction and prevention], Ros-tov-na-Donu, Izd-vo «Logos», 2005, 248 p.
2. Khodot V. V. Current vision of the nature and mechanism of coal and gas outbursts. *Materialy soveshchaniya po vnezapnym vybrosam uglya i gaza* [Coal and Gas Outburst Conference Proceedings], Ugletekhizdat, 1952. [In Russ].
3. Zaleskiy M. D. *Ocherk po voprosu obrazovaniya uglya* [Essay of generation of coal], Izd. Geol. Kom., 1914.

4. Val'ts I. E. *Metodika sporovogo analiza dlya tseyey sinkhronizatsii ugol'nykh plastov* [Spore analysis procedure towards synchronization of coal seams], Gostoptekhizdat, 1941.
5. Ayruni A. T. *Prognozirovaniye i predotvrashcheniye gazodinamicheskikh yavleniy v ugol'nykh shakhtakh* [Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines], Moscow, Nauka, 1987, 310 p.
6. Xia T., Wang X., Zhou F., Kang J., Liu J., Gao F. Evolution of coal self-heating processes in longwall gob areas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, Vol. 86, pp. 861–868. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.072.
7. Xia T., Zhou F., Gao F., Kang J., Liu J., Wang J. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams. *International Journal of Coal Geology*, 2015, Vol. 141–142, pp. 1–2. DOI: 10.1016/j.coal.2015.02.007.
8. Fel'dman E. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A. Physical kinetics of coal seam–methane system: mass transfer, pre-outburst phenomena. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no 3, pp. 46–65. [In Russ].
9. Fenghua An, Yuanping Cheng The effect of a tectonic stress field on coal and gas outbursts. *The Scientific World Journal*. 2014, Vol. 2014, ID 813063, 10 p. DOI: 10.1155/2014/813063.
10. Ming-Min Yang, Dong Jik Kim, Marin Alexe Flexo-photovoltaic effect. *Science*. 2018, Vol. 360, Issue 6391, pp. 904–907.
11. Smirnov V. G., Dyrdin V. V., Ismagilov Z. R., Kim T. L. Impact of decomposition of gas hydrates on propagation of fractures in coal ahead of temporary roadway face. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2016, no 3, pp. 96–103. [In Russ].
12. Smirnov V. G., Dyrdin V. V., Ismagilov Z. R., Kim T. L., Manakov A. Yu. Effect of linking with coal matrix on gas-dynamic phenomena during underground coal mining. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2017, no 1, pp. 34–41. [In Russ].
13. Xia T. Role of thermodynamic effect on coal-gas interactions during underground pre- and post- mining coal seams in the environmental geology. *J Environ Geol*. 2017;1(1):7–8. DOI: 10.4172/2591-7641.1000003.
14. Hui Li, Zengchao Feng, Dong Zhao, Dong Duan Simulation Experiment and Acoustic Emission Study on Coal and Gas Outburst. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, Vol. 50, Issue 8, pp. 2193–2205.
15. Luo Y., Li S. Excess Coalbed Methane Production Mechanism in the Process of Coal Tectonic Deformation. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2016, Vol. 4, pp. 175–178. DOI: 10.4236/gep.2016.47019.
16. Kolesnichenko E. A., Artem'ev V. B., Kolesnichenko I. E. *Vnezapnye vybrosy metana: teoreticheskie osnovy* [Methane outbursts: Theoretical framework], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2013, 232 p.
17. Kolesnichenko I. E., Artem'ev V. B., Kolesnichenko E. A. Evolution of investigations into methane safety during coal seam mining. *Ugol'*. 2019, no 7(1120), pp. 36–41. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-36-41.
18. Kolesnichenko I. E., Artem'ev V. B., Kolesnichenko E. A., Cherechukin V. G., Lyubomishchenko E. I. Theory of electro-wave physics of coal seams. *Gornaya promyshlennost'*. 2018, no 5, pp. 86–89. [In Russ].
19. Lyuber A. A. Types of metamorphosis of plant tissues into mineral carbon. *Khimiya tverdogo topliva*. 1934, no 5. [In Russ].
20. Nalivkin D. V. *Uchenie o fatsiyakh* [Theory of facies], Georazvedizdat, 1st edition, 1932; 2nd edition, 1933, 3rd edition, AN SSSR, 1956.
21. Khain V. E. Some basic notions in the theory of facies and formations. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiiy*. 1950. Vol. 25, no 6, pp. 3–28. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колесниченко Игорь Евгеньевич¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, заместитель директора по учебной работе, e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru, Колесниченко Евгений Александрович¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: prof-npi@yandex.ru,

Любомищенко Екатерина Игоревна¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: katya87lk@mail.ru,
Колесниченко Евгений Игоревич¹ – студент, e-mail: prof-npi@yandex.ru,
¹ Автодорожный институт (филиал) Южно-Российского государственного
политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.
Для контактов: Колесниченко И.Е., e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*I.E. Kolesnichenko*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,
Deputy Director for Academic Affairs, e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru,
*E.A. Kolesnichenko*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: prof-npi@yandex.ru,
*E.I. Lyubomishchenko*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: katya87lk@mail.ru,
*E.I. Kolesnichenko*¹, Student, e-mail: prof-npi@yandex.ru,
¹ Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University
(NPI), Shakhty, Russia.
Corresponding author: I.E. Kolesnichenko, e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru.

Получена редакцией 30.07.2019; получена после рецензии 21.11.2019; принята к печати 20.12.2019.
Received by the editors 30.07.2019; received after the review 21.11.2019; accepted for printing 20.12.2019.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ (2019, № 11, СВ 37, 664 с.)

Доклады Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле», проведенной в Горном институте КНЦ РАН, посвящены обсуждению современного состояния и актуальных проблем применения цифровых технологий, компьютерного моделирования объектов и процессов горного производства для решения задач рациональной и безопасной отработки месторождений полезных ископаемых, геомеханического обеспечения горных работ, комплексной переработки минерального сырья и экологических проблем горного производства. В представленных материалах отражены результаты исследований и практического применения разработок научных и проектных организаций, а также производственных предприятий в области цифровой трансформации горнодобывающей отрасли. Материалы сборника могут представлять интерес для широкого круга исследователей и инженеров, аспирантов и студентов высших учебных заведений, занимающихся научными и практическими проблемами разработки месторождений полезных ископаемых.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN MINING

Reports of all-Russian scientific-technical conference «Digital technologies in mining», held in the Mining Institute KSC RAS, devoted to a discussion of the current state and actual problems of application of digital technologies, computer modeling of objects and processes of mining production for solving problems of rational and safe mining of mineral deposits, geomechanical provision of mining operations, complex processing of mineral raw materials and environmental problems of the mining industry. The presented materials reflect the results of research and practical application of the developments of scientific and design organizations, as well as industrial enterprises in the field of digital transformation of the mining industry. The materials of the collection may be of interest to a wide range of researchers and engineers, graduate students and students of higher educational institutions engaged in scientific and practical problems of mineral deposits.