

Д.И. Борисенко, канд. техн. наук

*(Россия, Москва, Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского)*

РОЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭНЕРГОПЕРЕДАЧИ В САМОПОДДЕРЖАНИИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОДЗЕМНЫМ ПОЖАРАМ

Горение угля при подземном пожаре отличается от аналогичного процесса в энергетике в числе прочего размерами преобладающей по массе фракции: на электростанциях уголь предварительно измельчается, а при подземном пожаре горит как угольная мелочь, так и крупногабаритные куски, а при пожарах в целиках и пластах – горит забой.

Сразу нужно определиться с характерными размерами рассматриваемых явлений: понятно, что на макромасштабах, в ситуациях, когда уголь представляет собой куски размером с кулак (такие ситуации хорошо изучены ещё со времён широкого распространения паровой машины [1]) зависимость средней температуры угля от времени имеет сначала выпуклость вниз (эндотермический участок), а затем – выпуклость вверх (экзотермический участок), граница между этими участками – точка смены знака второй производной по времени – называется «точкой самовозгорания». А что происходит на масштабах, более мелких? Ещё в [2, стр.26] отмечено, что основной причиной проявления масштабного эффекта в углях является нарушение «структурного» подобия образцов различного размера вследствие неоднородностей петрографического состава и трещиноватости углей («объёмный» масштабный фактор). Однако, единой теории, описывающей поведение разнородной среды, каковой является уголь, при горении, до сих пор не существует.

Как представляется автору, картину горения угля применительно к подземным пожарам необходимо рассматривать комплексно – на разных уровнях, где масштабами могут являться мощность угольного пласта (макроуровень), характерные размеры структурных элементов угля (микроуровень), толщины молекулярных слоёв (наноуровень).

В силу различных теплофизических свойств структурных элементов, из которых состоит уголь, – главным образом, теплопроводности и термического расширения, – при подводе тепла изменение геометрических размеров таких элементов во времени не согласуются. Это приводит к возникновению напряжений в зонах контактов соседних зёрен. При превышении напряжениями определённых значений происходит разрыв связей между изоморфными кластерами, т.е. соседними структурными элементами угля, внутри которых свойства идентичны. При продолжении подвода тепла такие разрывы объединяются в микротрещины, а те, в свою очередь, – в макротрещины [3, стр.95–97].

Направление развития трещин определяется двумя факторами: строением горящего вещества (пространственным распределением его неоднородности) и градиентом температуры (направлением подвода тепла). Развитие трещин продолжается по мере подвода тепла.

Для поддержания горения в стационарном режиме требуется предварительный прогрев горящего вещества. Поскольку уголь является осадочной породой, имеет место приоритетная ориентация слоёв – параллельно почве и кровле пласта, поэтому прорастающие вследствие термического механизма разрушения трещины должны иметь преимущественную ориентацию, параллельную напластованиям, сонаправлено пласту угля. С другой стороны при пожарах, особенно продолжительных (известны случаи горения угля – только по документально подтверждённым сведениям [4, стр. 439] – на протяжении двух тысяч лет), когда выгорают значительные объёмы угля, фронт горения распространяется по направлению пласта (по простиранию и падению), т.е. параллельно напластованиям. Таким образом, трещины прорастают от фронта горения в невозмущённую зону – вглубь пласта. В случае возникновения параметрического резонанса микроразрывы сливаются в одну трещину, которая при прорастании на свободную поверхность обеспечивает подсос окружающей газообразной среды. В момент образования трещины между её берегами отсутствует сплошное заполнение, т.е. там вакуум, в который устремляется та часть окружающей среды, которая способна быстро перемещаться, а поскольку большинство трещин при горении прорастают по градиенту температуры – т.е. выходят на горящую поверхность, такой подвижной частью среды являются горячие газы и пламя. Поскольку теплопроводность угля низкая – ниже, чем у вмещающих пород, и не превышает 3,44 Вт/(м·К) [5, стр. 38 – 41], прорастание трещин на горящую поверхность способствует прогреву угля – увеличивает глубину прогрева – и тем самым поддерживает процесс горения. Таким образом, горение само себя продвигает вглубь горячей среды посредством трещинообразования. [6, стр.77].

Кроме описанного механизма термического разрушения, свойственного большинству горных пород, горение угля характеризуется выделением газов, что также влияет как на интенсивность процесса его горения, так и на его разрушение при горении.

Локальное изменение интенсивности процесса горения угля может объясняться изменением интенсивности горения выделяющихся из него газов. Газовыделение тем выше, чем больше газовыделяющая поверхность, а размер этой поверхности связан с процессом трещинообразования. Если в угле образуются трещины, расстояние между берегами которых превышает длину свободного пробега молекулы выделяющегося газа, то такие трещины способствуют усилению газовыделения, и, как следствие, интенсификации процесса горения. [7, стр. 19]

Кроме этого, как отмечено в [7], картина тепломассообмена в контрольном объёме определяется взаимным расположением фрагментов горящего угля: в зоне, со всех сторон окружённой тепловыделяющими поверхностями, рассеивание тепла меньше, чем в зоне, лишь с одной стороны ограниченной греющей поверхностью. Соответственно в таком объёме выше температура. Таким образом, трещинообразование способствует локальной концентрации тепла, что также приводит к интенсификации процесса горения, в результате чего он является самоподдерживающимся.

Образующаяся в процессе горения угля двуокись углерода может участвовать в формировании адсорбционно-сольватных структур в микротрещинах, возникающих в процессе горения, чем обуславливает эффект Ребиндера [8]. Таким образом, процесс горения способствует механической дезинтеграции горящего угля, а, следовательно, развитию поверхности. А поскольку горение происходит на поверхности, то чем больше площадь такой поверхности, тем интенсивнее процесс горения.

В случае, когда горящий уголь находится под давлением, дело обстоит несколько сложнее. Во-первых, непосредственно на забое имеет место отжим угля в выработанное пространство. Во-вторых, горящий угольный забой в силу нагрева расширяется и потому также выпирает туда, куда может выпирать – т.е. в выработанное пространство, где влияние горного давления не сказывается. Остаётся только весьма ограниченная зона – непосредственно на границе отжатого угля и невозмущённого пласта. Поскольку именно эта зона отвечает за распространение горения вглубь пласта необходимо рассмотреть подробнее процессы, в ней происходящие.

Вследствие механизма трещинообразования при горении образуются новые свободные поверхности (берега трещин). Поскольку в природе подобные изменения происходят не скачкообразно, а обладают конечной продолжительностью, то имеет место переходный процесс: расстояние между берегами трещины сначала раскрывается до максимального значения, проходит «мёртвую точку» и сокращается, проходит через минимум и снова увеличивается, проходит через второй по величине максимум и т.д. Колебания образующихся при трещинообразовании свободных поверхностей генерируют акустические импульсы [9].

Как отмечалось выше, образующиеся трещины преимущественно направлены параллельно напластованиям. Горное давление сжимает пласт таким образом, что прижимает напластования друг к другу, чем, во-первых, препятствует трещинообразованию, а, во-вторых, подавляет переходные процессы развития длины расстояния между берегами образующихся трещин. Тем не менее, опять же в силу локальной (на всех уровнях, но главным образом – на микроуровне) неоднородности, трещины всё-таки появляются и развиваются. И вышеозначенный переходный процесс – пусть в подавленном виде – имеет место: при развитии трещины расстояние между её берегами проходит через максимум. В этот момент под действием адсорбции различных газов (главным образом продуктов горения) на берегах трещины формируются условия (сольватные структуры), не позволяющие горному давлению залечивать образующиеся трещины.

Как было отмечено выше, при горении уголь прогревается на некоторую глубину. В прогретом слое формируются условия для протекания разнообразных химических реакций. Следует заметить, что эти реакции могут быть как эндогенные, так и экзогенные, причём в соседних зонах внутри рассматриваемого слоя характер тока тепла может быть различным. Мало того – в одной и той же зоне, как под действием внешних условий, так и в силу свойств веществ самой зоны, комбинация поглощения и выделения тепла может носить сложный характер в зависимости от времени.

Причём, для некоторых имеющих место при горении угля реакций требуются температуры, гораздо большие, чем даёт горящий уголь, однако эти реакции протекают, и можно обнаружить их продукты. На взгляд автора никаких противоречий в этом нет, просто всё определяется локальной неравномерностью энергопередачи. В некоторой области прогретого слоя, с характерными размерами, доступными для аппаратного контроля, в отдельных зонах на масштабах, гораздо меньших, чем размеры чувствительных элементов современной аппаратуры (поэтому зафиксировать это инструментально весьма проблематично) – в силу пока не рассматриваемых причин – концентрируется энергия за счёт перетекания из остальных зон, расположенных в указанной области. Этой энергии достаточно для реализации определённых

явлений (разрыва связей между соседними структурными элементами, акта прорастания трещины, протекания химических реакций с участием различных элементов и т.д.). При этом в остальных зонах рассматриваемой области, суммарный объём которых на порядки больше суммарного объёма зон реакции, никаких событий, требующих энергозатрат, происходить не будет, т.к. в них просто оказывается недостаточно для этого энергии. Речь идёт о зонах с характерными размерами минимальных структурных элементов угля – десятками и даже единицами микрон. Интенсивность колебания молекул в таких зонах может соответствовать температурам, превышающим критические значения эндотермических явлений, в то время как средняя температура рассматриваемой области гораздо ниже таких значений.

В силу ограничения возможностей инструментального контроля удобно использовать модели, оперирующие интегральными понятиями – равномерно «размазанными» по всему веществу (по всей рассматриваемой области). Однако, как представляется автору, нельзя применять понятие аддитивности к характеристикам угля при рассмотрении физики процесса его горения, потому что имеющие место явления (трещинообразование, газовыделение, химические превращения) носят явно выраженный локальный (дискретный) – как в пространстве, так и во времени – характер.

При использовании же угля в качестве топлива, когда первостепенный интерес представляют средние энергетические показатели (такие, как теплота сгорания), рационально опираться на интегральные характеристики угольного вещества и отдельных его частей [10].

Итак, при развитии очага пожара в угольном пласте мы наблюдаем явные свидетельства самоподдержания процесса горения угля, причём происходит это с явной условной периодичностью – энергия накапливается, затем происходит предельный переход, после чего снова накапливается энергия и т.д. Важно отметить, что подобная неоднородность предельных переходов имеет место не только во времени, но и в пространстве: энергия не распределена равномерно, а концентрируется в некоторых зонах, в которых реализуются предельные переходы. И так на всех уровнях. На микромасштабе – разрывы связей между структурными элементами; на мезомасштабе – образование трещин, диагностируемых по регистрации акустических импульсов; на макромасштабе – диспергирование угля и макронеоднородности интенсивности процесса его горения.

Таким образом, причина самоподдержания процесса горения в локальной неоднородности процессов энерговыделения/энергопотребления – энергия, перетекая с большей области, концентрируется в меньшей области (как по пространству, так и по времени), в результате чего совершает предельные переходы, требующие абсолютных значений энергозатрат больше, чем это следует из предположений, подразумевающих равномерное распределение значений величин.

Список литературы

1. Дурилин П.Н. Состав и испытание каменных углей России. Химические исследования и испытания в топках паровых котлов. Москва: Типография М.Александровой, 1916. – 150 стр.;
2. Влияние масштабного фактора на прочность углей. Чирков С.Е. Изд-во «Наука», 1969 г. – 113 стр.;
3. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород [Текст]: Учебник для вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 стр.;
4. Горная энциклопедия в 5 томах. – М.: Советская энциклопедия, 1984–1991.Т.4. (Ортин – Социосфера), 1989. – 624 стр.
5. Черняк, З.А. Физические свойства углей и вмещающих пород как объект аппаратного контроля [Текст] / З.А. Черняк – М.: Наука, 1985. – 128 стр.;
6. Борисенко, Д.И. Влияние сжатия на интенсивность процесса горения образца угля в лабораторных условиях: изменение состава воздуха в зоне горения [Текст] / Д.И. Борисенко // Сборник научных статей Современная наука 2010 №3(5). – С.77-80;
7. Борисенко, Д.И. Влияние разрушения образца угля на интенсивность процесса его горения в лабораторных условиях [Текст] / Д.И. Борисенко, В.А. Азаренко, В.Н. Черников // Сборник научных статей Современная наука 2010 №3(5). – С.15-20;
8. Силина, Л.Б./ Физико-химические процессы в трещиновато-пористой структуре угля, взаимодействующего с поверхностно-активными средами [Текст] /Л.Б. Силина/ Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – 2010, №336. – С.180-190;
9. Борисенко, Д.И. Разработка способа акустической идентификации горения угля для диагностики очагов пожаров в угольных пластах [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук, / Д.И. Борисенко М: 2007. – 21 стр.;
10. Пинчук, В.А. Структура, свойства и энтальпия образования органической части длиннопламенных и газовых углей [Текст] / В.А. Пинчук, М.В. Губинский // Сборник научных статей Современная наука 2010 №3(5). – С.3-10.

Рекомендовано до друку проф. Бондаренко В.І.

