УДК 622.82:620.17

ВЛИЯНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦА УГЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ЕГО ГОРЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Борисенко Д.И.[1], Азаренко В.А.[1], Черников В.Н.[2]

[1]Национальный научный центр горного производства –
– Институт горного дела им А.А.Скочинского, Люберцы, Россия
[2]Институт обогащения твёрдого топлива, Люберцы, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе описывается проведенный эксперимент по исследованию связи разрушения образцов кузбасского угля при одноосном сжатии с интенсивностью процесса их горения. Интенсивность процесса горения оценивалась по концентрации кислорода, двуокиси углерода и угарного газа, а также температуре непосредственно вблизи горящей поверхности образца. Под разрушением понималась фрагментация образцов на отдельные куски. Установлено, что интенсивность горения угля зависит от его разрушения.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в угледобывающей отрасли страны на подземные пожары приходится более половины всех аварий, возникающих на горных предприятиях [1, стр.169]. Наиболее опасны эндогенные пожары, возникающие в выработанном пространстве, на целиках и в местах геологических нарушений, в которых установить чёткое местоположение очагов возгорания не всегда представляется возможным. Известны случаи, когда возникшие эндогенные пожары наблюдались тысячелетиями, например, подземное горение угля в урочище Кухи Малик в долине реки Ягноб на территории Таджикистана упоминается ещё в «Естественной истории» Плиния Старшего [1, стр.439], жившего в 23 – 79 гг.н.э.

Почему же эндогенные пожары настолько «живучи»? Ответ напрашивается только один – эндогенные пожары в угольных пластах являются самоподдерживающимися процессами, то есть, предоставленные самим себе, они будут продолжаться до тех пор, пока не сгорит весь доступный уголь.

Для управления процессом горения (его интенсивностью, направлением развития, а главное, для угнетения пожара и полного его подавления) важно понять, какие физико-химические явления позволяют пожару в угольном пласте стать самоподдерживающимся процессом.

Систематические исследования процесса горения кускового угля, то есть образцов угля, характерные размеры которых превышают характерные размеры в зоне горения (длина свободного пробега молекул в газовых продуктах горения, толщина температурного, гидродинамического и концентрационного пограничных слоёв, диаметры конвективных вихрей, образующихся в процессе горения) или сопоставимы с ними, проводились ещё в начале прошлого века [2], когда кусковой уголь активно применялся для нужд энергетики и транспорта. В последующие годы применительно к энергетике стало актуально исследовать процессы горения измельчённого угля, обладающего гораздо большей удельной поверхностью. Таким образом, бóльшая часть знаний по горению угля на макромасштабах базируется на экспериментах, проведенных почти сто лет назад. Однако возможности экспериментального оборудования (средств воздействия и регистрации), применявшегося в то время, значительно уступают современным, вследствие чего некоторые эффекты, возникающие при горении угля, не были замечены, и их описание отсутствует в литературе до сих пор. Настоящая работа ставит целью исправить это досадное упущение.

ГИПОТЕЗА

Сделаем предположение, что, поскольку горение является процессом химического превращения на границе реагирующего вещества, его интенсивность пропорциональна поверхности горения. Таким образом, увеличение поверхности горящего вещества может интенсифицировать горение.

Проанализируем понятие «интенсивности горения». Поскольку цель настоящей работы заключается в описании процессов, протекающих в

© Борисенко Д.И., Азаренко В.А., Черников В.Н.

очаге пожара в угольном пласте, будем ориентироваться на понятия, связанные с пожарами в шахте. В работе [3, стр.386] говорится: «*О степени развития процесса самовозгорания можно судить по изменению состава и свойств воздуха. Эти изменения заключаются в уменьшении содержания O_2, повышении концентрации CO_2, появлении CO, газообразных углеводородов (этана, этилена, пропана, бутана и др.), водорода, повышении температуры и влажности воздуха*». Поэтому под интенсивностью горения будем понимать совокупность концентраций кислорода, двуокиси углерода и угарного газа, а также температуры в пространстве, непосредственно прилегающем к горящей поверхности угля.

Предположим, что уголь, как и любое другое вещество, горит с изменяющейся во времени интенсивностью, по мере выгорания горит всё слабее и в конце гаснет.

Проведенными ранее исследованиями [4] установлено, что при горении угля происходит его разрушение, степень и характер которого зависит от марки угля. Однако, измерений, позволяющих судить об изменении интенсивности процесса горения в той постановке, как мы условились в этой работе, в [4] не проводилось. Настоящая работа посвящена прослеживанию связи развития процесса горения образцов угля во времени с изменением интенсивности их горения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Интенсивность процесса горения определялась по результатам измерений газовыделения (замерам концентраций индикаторных газов O_2, CO_2 и CO) и температуры на внешней границе контрольного объёма. Под контрольным объёмом подразумевалась зона, охватывающая горящую поверхность образца угля. При этом ограничивающая её дальняя от наблюдателя воображаемая плоскость находилась внутри образца угля, а ближняя – снаружи образца. От рабочей (горящей) поверхности образца эта зона отстояла на расстояние, соответствующее изменению линейного размера образца в направлении подвода тепла при нагреве.

Эксперименты проводились с образцами каменного угля (марки КО, шахта им.В.И.Ленина, г.Междуреченск Кемеровской обл. Российской Федерации) размерами 40×60×30 мм (толщина (база) × ширина × высота). Размеры образцов соответствовали макроразмерному куску угля. Для этого их характерные размеры должны превышать характерные размеры в зоне горения: длины свободного пробега молекул в газовых продуктах горения, толщины температурного, гидродинамического и концентрационных пограничных слоёв, диаметры конвективных вихрей, образующихся в процессе горения. Образцы представляли собой правильные параллелепипеды с отшлифованными гранями. Перед началом эксперимента образец заподлицо с рабочей поверхностью вставлялся в специальное П-образное направляющее ложе, выточенное из цельного куска стали Ст45, с толщиной стенки 16 мм, по которому свободно перемещался стальной поршень (рис.1).

С поршнем жёстко соединены кронштейны, на которых размещены индикаторы линейного перемещения часового типа с ходом штока 10 мм и точностью измерения 10 мкм. Движение поршня по направляющему ложу осуществлялось под действием ручного гидравлического пресса, развивающего усилие до 160 кгс/см^2, в котором крепилась конструкция, содержащая направляющее ложе, поршень с кронштейнами и индикаторами и помещённый между дном направляющего ложа и нижней поверхностью поршня образец угля так, чтобы напластования материала образцов располагались строго параллельно сжимающим плитам пресса. Следовательно, сжимающее усилие пресса сдавливало образцы в направлении, перпендикулярном плоскостям напластований:

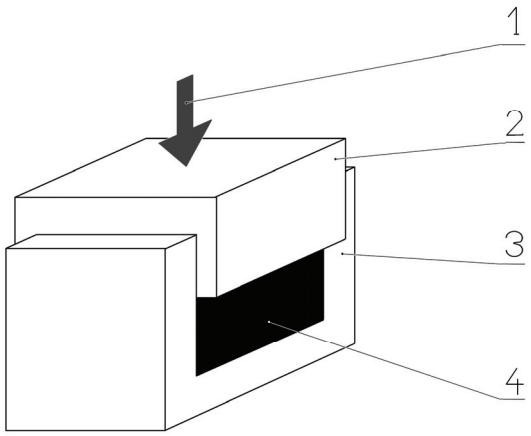

Рис.1 Схема расположения образца в экспериментальной установке: 1 – направление сжимающего воздействия пресса; 2 – поршень; 3 – направляющее П-образное ложе; 4 – образец угля.

прижимало слои друг к другу и, в случае образования трещин, должно было соединять их берега. Образцы изготавливались таким образом, чтобы сжимаемые стороны располагались строго параллельно напластованиям материала, и устанавливались нагреваемой поверхностью заподлицо с гранью направляющего ложа. Кроме функции направления поршня, ложе играло роль ограничителя перемещений (выпячивания) в

стороны боковых вертикальных поверхностей образца при нагреве и внешнем давлении, создаваемом прессом, что моделировало ситуацию, имеющую место в реальном угольном пласте, где рассматриваемый контрольный объём угля может расширяться только в сторону выработанного пространства.

Для выявления наличия связи между изменением интенсивности горения образцов угля во времени и явлениями, происходящими при этом, поступили следующим образом.

Для образцов угля различной формы и размеров, а также при изменении интенсивности подвода тепла и внешнего нагружения (усилие сжатия пресса) измеряли линейные размеры образца в направлении, совпадающем с направлением хода поршня пресса (то есть изменение высоты образца). Кроме этого измеряли те величины, по которым мы условились определять интенсивность процесса горения – концентрации кислорода (O_2), двуокиси углерода (CO_2) и угарного газа (CO), а также температуру непосредственно у горящей поверхности образца.

В дополнение к этому измерялась температура торца образца, противоположного нагреваемому, что позволяло контролировать сплошность исследуемого образца.

Объясняется это следующим образом.

- Образцы изготавливались и располагались таким образом, чтобы напластования в них были строго параллельны сдавливающим плитам пресса – перпендикулярно нагреваемой поверхности.
- Образование трещин, вызванных горением, наиболее вероятно вдоль напластований, то есть в направлении от горящего торца к торцу, на котором установлены акустические датчики.
- Температура поверхности горения исследуемых образцов составляла больше тысячи градусов Цельсия. За время эксперимента (в течение 1–1,5ч нагрева и самостоятельного горения образца до тушения) торец образца, противоположный горящему, в неразрушенном образце должен был прогреваться до нескольких десятков градусов Цельсия, вследствие низкой теплопроводности угля (λ_{max}=1,8 Вт/(м•К) [5], стр.38 – 41).

Таким образом, если температура торца образца, противоположного нагреваемому, достигала нескольких сотен градусов Цельсия, можно было констатировать появление магистральных трещин в образце, по которым передавалось тепло, т.е. фрагментацию образца.

Внешний вид части стенда, содержащей образец угля, представлен на рис.2.

Ниже описан алгоритм проведения экспериментов.

- Образец помещался в направляющее ложе под поршень с закреплёнными на нём индикаторами, затем вся конструкция устанавливалась между рабочими плитами пресса.
- Включалась запись акустических сигналов на компьютер.
- Делалось два отбора проб атмосферы из зоны, непосредственно прилегающей к рабочей поверхности исследуемого образца угля.
- Затем начинался вынужденный нагрев рабочей

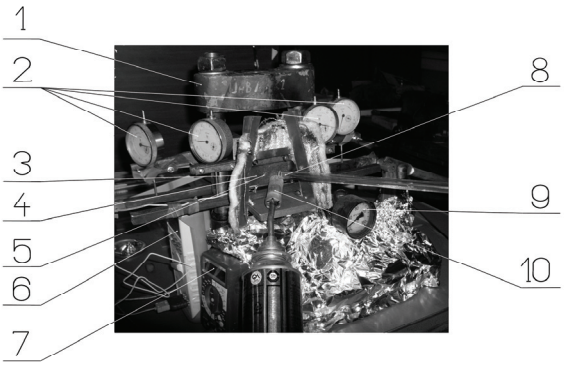

Рис.2 Внешний вид экспериментальной установки:
1 – ручной пресс; 2 – индикаторы линейных перемещений часового типа; 3 – теплоизоляция; 4 – рабочий (горящий) торец исследуемого образца угля; 5 – чувствительный элемент платинородий-платиновой термопары; 6 – мультиметр, показывающий значение температуры на горящем торце образца угля; 7 – мультиметр, показывающий значение температуры на торце образца угля, противоположном горящему; 8 – пробозаборник газоанализатора Delta-65 (на рисунке не показан); 9 – манометр, показывающий усилие, создаваемое прессом; 10 – сопло газовой горелки.

поверхности исследуемого образца угля ударной струёй открытого пламени горящего изобутана, и после достижения самостоятельного горения образца, горелка удалялась из зоны проведения эксперимента.

- Отборы газа осуществлялись непрерывно, насколько это позволяла аппаратура (с учётом вывода результата измерений на печать средний интервал между замерами концентраций индикаторных газов составлял две минуты).
- Когда визуальные наблюдения за горящей поверхностью образца показывали, что она вся покрыта сеткой трещин (напомним, что перед экспериментом поверхности образцов

шлифовались), образец угля сжимали прессом, усилие которого изменялось ступенчато и прекращалось при разрушении образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.3 представлены зависимости сжимающего воздействия пресса, температуры горящего торца образца угля и температуры отбираемых в газоанализатор проб газов от времени.

Температура проб газа имеет значения на полтора порядка ниже температуры горящей поверхности образца, потому что перед входом в

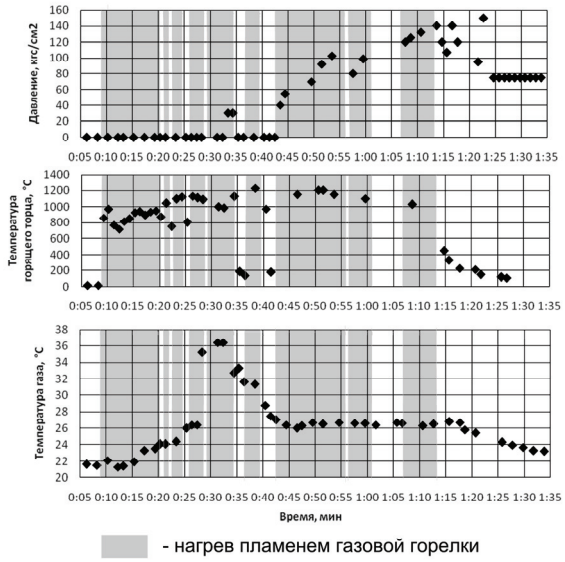

Рис.3. Зависимости сжимающего воздействия пресса (в кгс/см^2), температуры горящего торца образца (в °С) и температуры проб газа из зоны горения образца в газоанализаторе (в °С) от времени: затемнены временные интервалы, в течение которых на торец образца оказывалось воздействие пламенем газовой горелки.

газоанализатор исследуемая среда проходила через теплообменник несмешивающего типа, для того, чтобы обезопасить газоанализатор от перегрева.

Разумеется, делать строгие количественные расчёты, опираясь на эти измерения нельзя, но для качественных выводов приведенные данные вполне пригодны.

Как видно из зависимостей на рисунке 3, нагрев образца газовой горелкой начался на десятой минуте эксперимента. Температура горящего торца образца быстро достигает значения 900 °С и её зависимость от времени имеет почти монотонный характер, постоянно немного увеличиваясь. Температура отбираемой газоанализатором среды из зоны горения со временем возрастает. Как уже отмечалось, абсолютные значения этой температуры не могут приниматься в расчёт из-за наличия теплообменника в тракте газоанализатора, но, качественно хорошо видно, что на рассматриваемом временном интервале температура газов в зоне горящей поверхности растёт.

На 33-ей минуте эксперимента было установлено давление пресса, равное 30 кгс/см^2, которое удерживалось на этом уровне 30 секунд, после чего было снижено до 0. Температура газов в зоне горения от времени начала уменьшаться, и эта зависимость продолжалась до тех пор, пока, пока на 44-ой минуте эксперимента не было снова приложено внешнее сжимающее воздействие прессом, равное 55 кгс/см^2. После этого, температура забираемых из зоны горения газов перестала уменьшаться и стабилизировалась на некотором значении, не зависящем от давления.

Отметим, что такое поведение температуры, отбираемой с границы контрольного объёма газовой среды, имеет место вне зависимости от режима горения: оно справедливо как при внешнем подводе тепла (нагреве газовой горелкой), так и при самостоятельном горении образца (соответственно закрашенные и незакрашенные зоны на рис.3). Давление ступенчато увеличивалось до значения 70 кгс/см^2, и каждый раз при прекращении подкачки масла в гидравлической системе пресса оставалось на заданном уровне до следующего увеличения. Температура горящей поверхности при этом оставалась примерно на одном уровне. Также, примерно постоянной, сохранялась и температура газов, отбираемых из зоны горения. Когда же устанавливаемые на прессе давления начали превышать значение 75 кгс/см^2, при прекращении подкачки масла в гидравлической системе пресса значение давления монотонно уменьшалось со временем, причём, чем выше устанавливаемые давления, тем более явно выражен этот эффект, что свидетельствует о механическом разрушении угля нагрузкой пресса при давлениях, превышающих предел прочности угля. При достижении сжимающим воздействием значения 140 кгс/см^2 произошло макроскопическое разрушение образца, сопровождаемое характерным треском. После достижения 150 кгс/см^2 давление упало до значения 75 кгс/см^2 и оставалось на нём, не реагируя на увеличение давления пресса.

Что же касается интенсивности процесса горения, то изменение концентраций индикаторных газов (кислорода, двуокиси углерода и угарного газа) от времени для того же образца, для которого

приведены экспериментальные данные на рис.3, представлено на рис.4.

Отметим, что поскольку нагрев образца угля осуществлялся горящим изобутаном, по реакции $2C_4H_{10} + 13O_2 \rightarrow 8CO_2 + 10H_2O$ в зоне горения образовывалась двуокись углерода. Поэтому выделить количественно долю CO_2, образовывающуюся в результате горения угля, из всей пробы не представлялось возможным. Однако, для качественной оценки исследуемого процесса, полученные данные вполне пригодны.

Из зависимостей на рис.4 видно, что газоанализатор «почувствовал» момент начала нагрева. Об этом свидетельствует характерное изменение концентраций индикаторных газов на десятой минуте эксперимента. Заметное изменение показаний газоанализатора в районе семнадцатой

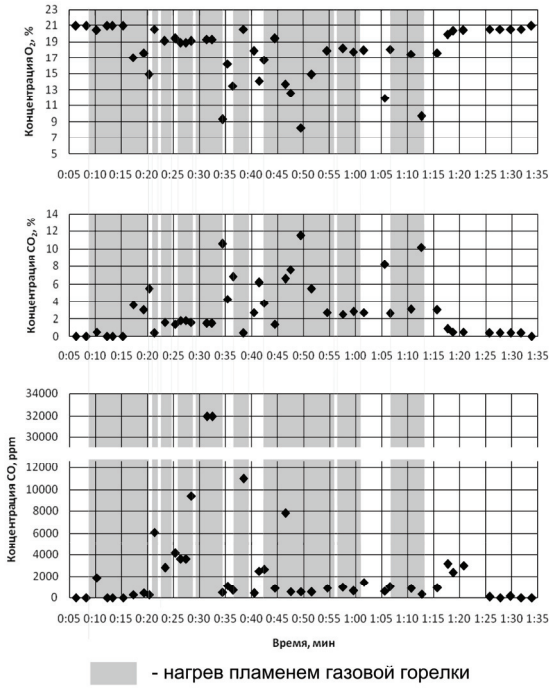

Рис.4. Зависимость концентрации кислорода (в %), концентрации двуокиси углерода (в %) и концентрации угарного газа (в частицах на миллион) от времени (в минутах): затемнены временные интервалы, в течение которых на торец образца оказывалось воздействие пламенем газовой горелки.

минуты объясняется изменением положения трубки воздухозаборника газоанализатора – её придвинули ближе к горящей поверхности образца. Это показывает, что местоположение забора газа влияет на количественные значения измеряемых концентраций газов. Отметим, что и на зависимости температуры газа от времени (см. рис.3) также можно увидеть небольшое увеличение температуры в соответствующей координате.

После завершения переходных процессов, связанных с изменением положения трубки воздухозаборника, процесс горения протекает с некоторой интенсивностью, резко усиливающейся при сжатии образца прессом. Большие значения концентрации угарного газа в отбираемых пробах могут объясняться выдавливанием угарного газа из системы трещин, сжимаемой внешним воздействием. После снятия внешнего нагружения наблюдаются мощные пульсации концентрации индикаторных газов, что свидетельствует о переменности интенсивности процесса горения на данном этапе. После повторного приложения давления, начиная с момента, когда его значение превышает предел прочности образца, диапазон изменения концентраций индикаторных газов уменьшается, и можно констатировать ослабление интенсивности процесса горения. Когда же происходит макроскопическое разрушение (фрагментация образца), наблюдается изменение всех показателей (включая температурную зависимость на рис.3), однозначно трактуемое как усиление интенсивности процесса горения.

Визуально картина горения образца практически не отличается для двух случаев: горения образца без сжимания и при сжимании прессом, а интенсивность, определяемая по концентрации индикаторных газов и их температуре, различается принципиально, как это видно из рис.3 и 4. Сжимающее воздействие пресса влияет, в первую очередь, на величину раскрытия трещин, параллельных напластованиям угля, что сильно сказывается на интенсивности газовыделения из образца. Поэтому, по-видимому, изменение интенсивности процесса горения угля в наших условиях объясняется изменением интенсивности горения выделяющихся из него газов.

Газовыделение тем выше, чем больше газовыделяющая поверхность, а размер этой поверхности зависит от сжимающего воздействия. 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. Сжимающее воздействие в перпендикулярном напластованиям направлении сдвигает берега трещины друг к другу, чем резко сокращает площадь газовыделяющей поверхности и ослабляет интенсивность процесса горения. Если же сжимающее усилие вызывает фрагментацию образца, это означает, что в контрольном объёме при неизменном количестве вещества увеличивается поверхность и, следовательно, интенсифицируется газовыделение, а с ним и процесс горения.

Отметим, что для построения строгой математической модели процесса необходимо учитывать критерий прочности угля, полученный с учётом вида напряжённого состояния и других влияющих факторов [6, стр.111]. Вероятно, в реальном пласте угля процесс горения будет отличаться большей интенсивностью: вследствие бóльших масштабов свободноконвективное обтекание горящей поверхности будет характеризоваться гораздо более высокими скоростями, что создаст заметное разрежение вблизи горящей поверхности, и, как следствие, подсос горящих газов из пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, интенсивность горения разрушающегося (в результате сдавливания или в трещинообразовании, вызванного горением) куска угля на некоторое время усиливается и способно поджечь соседний свежий уголь. Поскольку в условиях угольного пласта рядом с догорающим (разрушающимся) куском угля имеется практически неограниченный запас свежего угля (причём, его часть, обращённая к пожару, успевает прогреться) то процесс горения угля в пласте действительно является самоподдерживающимся.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горная энциклопедия в 5 томах. – М.: Советская энциклопедия, 1984–1991.Т.4. (Ортин – Социосфера), 1989. – 624 стр.
2. Дурилинъ П.Н. Составъ и испытаніе каменныхъ углей Россіи. Химическія изслѣдованія и испытанія въ топкахъ паровыхъ котловъ. Москва: Типографія М.Александровой, 1916. – 150 стр.
3. Килячков А.П., Брайцев А.В. Горное дело: Учебник для техникумов. – М.: Недра, 1989. – 422 с.
4. Борисенко Д.И. Сравнение разрушения различных углей при горении. В кн.: Deformation & Fracture of Materials – DFM2006/ Book of articles, edited by Yu. K. Kovneristiy et al. – Moscow: Interkontakt Nauka, 2006. – С. 535–537.
5. Черняк З.А. Физические свойства углей и вмещающих пород как объект аппаратурного контроля. – М.: Наука, 1985. – 128 с.
6. Докукин А.В., Чирков С.Е., Норель Б.К. Моделирование предельно-напряженного состояния угольных пластов. М.: Наука, 1981. – 150 с.