

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор,
Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор,
(ИГТМ НАН Украины),
Бокий Б.В., д-р техн. наук
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОЛЛАПСА ЗОНЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНОМ МАССИВЕ

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор,
Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор,
(ИГТМ НАН України),
Бокий Б.В., д-р техн. наук
(ПАТ «Шахта ім. А.Ф. Засядька»)

ДЕЯКІ ЗАУВАЖЕННЯ ДО ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КОЛАПСА ЗОНИ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ВУГІЛЬНОМУ МАСИВІ

Bulat A.F., Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor
Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine)
Bokiy B.V., D. Sc. (Tech.)
(PJSC "Mine named after A.F. Zasyad'ko")

SOME OBSERVATIONS ON COLLAPSE SIMULATION MODEL OF ZONE WITH GAS- DYNAMIC PHENOMENA IN COAL MASS

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

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

Ранее [1, 2] на основе обширной экспериментальной информации была построена кластерно-синергетическая эволюционно-структурная модель газодинамических явлений (ГДЯ) в угольном массиве. Её основу составили следующие основные положения. В угольном массиве очаги опасности ГДЯ образуются в основном в геологическое время под влиянием тектонических и геохимических процессов: возможно образование их и в историческое время. Эволюция системы уголь – газ – влага отличается локальностью и дискретностью. В вершине движущейся трещины локальный разогрев может достигать частичной термодеструкции вещества, что будет способствовать интенсивной метаногенерации и дроблению угля вплоть до образования наночастиц.

Микротрещины в угле способны диссипировать, т.е. рассеивать энергию, которая уменьшает напряжения в устьях трещин и приостанавливает их рост. Сформировавшиеся при этом зоны с изменённой структурой вещества могут объединяться, образуя гигантскую флуктуацию (магистральную трещину), остановка которой предполагает образование очага опасности.

В очагах опасности по сравнению с нетронутым массивом всегда будут более высокая температура, давление свободного газа, повышенное производство энтропии и все химические реакции будут проходить более ускоренно.

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

В системе уголь – газ – влага в процессе эволюции очага опасности под действием горного давления и давления газа концентрация микротрещин возрастает вплоть до состояния, когда они начинают сливаться и локально образуют зоны с существенно изменённой структурой вещества. Такие зоны некоторое время находятся в квазиравновесном состоянии, а колебания их основных параметров (напряжение, давление газа, скорость метаногенерации и т.д.) не выходят за допусаемые пределы.

При достижении основными параметрами некоторых критических значений под действием малых возмущений техногенного или природного характера квазиравновесное состояние нелинейной неравновесной системы может быть нарушено. Это выражается в росте древовидного ансамбля трещин и аномальной метаногенерации из движущихся трещин; диссипация энергии резко возрастает, что повышает температуру и диссипацию энергии. Такое взаимодействие между температурой и диссипацией приводит к резкому нелинейному увеличению температуры; процесс из метастабильного превращается в лабильный, что приводит систему к тепловому взрыву. При этом сохраняется принцип температурно-временной суперпозиции.

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

Если теплообмен в системе идёт быстрее, чем теплообмен с окружающим пространством (например, с угольным массивом), используется критерий Н.Н. Семёнова – так называемая нестационарная теория теплового взрыва; условия «взрыва» определяются как условия прогрессивного увеличения разогрева системы, т. е. повышения температуры с увеличением времени реакции (рис. 1):

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

где T_0 – температура окружающей среды;
 Q – тепловой эффект реакции;
 λ – коэффициент теплопроводности вещества;
 E – энергия активации;
 r – характерный размер области взрыва;
 R – газовая постоянная;
 k_0 – предэкспоненциальный фактор;
 V – объём реагирующего вещества;
 S – поверхность теплоотдачи.

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).



Рисунок 1 – Диаграмма Н.Н. Семёнова

Для газодинамических явлений в угольном массиве более подходит нестационарная теория теплового взрыва Н.Н. Семенова, так как скорость ((5-30) с) протекания реакции такова, что теплообмен внутри зоны ГДЯ будет идти намного быстрее, чем теплообмен с окружающим угольным массивом вследствие низкой теплопроводности окружающей среды. Рассмотрим её более подробно.

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

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

а скорость теплоотвода –

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

где α – коэффициент пропорциональности.

Соотношение между количеством накапливающейся в системе теплоты и температурой обычно представляют в виде диаграммы Н.Н. Семенова (рис. 1).

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

Следует подчеркнуть, что тепловой взрыв очага опасности ГДЯ как экзотермическая реакция первого порядка становится возможным при случайном совпадении 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 газовой выделения (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 газовой выделением). ГДЯ может произойти и при остановке работ из-за природных воздействий и релаксации пласта.

Геометрические размеры зоны ГДЯ (полости) образуются в процессе теплового взрыва и связаны с двумя основными эффектами: *первый* – в зоне практически отсутствует кислород, поскольку его не пропускает метан, находящийся под давлением, что исключает самовозгорание газа; *второй* – 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, так как она характерна для всех экзотермических реакций. При этом

благодаря низкой теплопроводности угля именно в больших зонах опасности (даже несмотря на их квазиустойчивое состояние) будет развиваться аномально высокая температура. В отличие от температуры акустическую эмиссию более сложно идентифицировать. В равной степени (по значению сигнала) она присуща малым трещинам и зонам ГДЯ различных размеров.

Из модели следует вывод: скорость проходки не играет существенной роли вплоть до «критического» приближения к очагу опасности; естественно, следует учитывать «незначительные» очаги: за одну смену возможно несколько выбросов угля и газа малой интенсивности.

Механизм газодинамических явлений удобно моделировать с помощью теории катастроф (ГДЯ – типичная катастрофа типа сборки). Газодинамическое явление можно 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 мощными турбулентными потоками. Математическое описание такого процесса весьма проблематично.

Некоторые важные предпосылки к дальнейшим исследованиям. Эти предпосылки весьма необходимы в связи со сложностью процессов, протекающих в зонах ГДЯ и неизученностью химических реакций.

Температура в очаге опасности ГДЯ. При объёмном сжатии образцов угля О.Н. Малинникова получила превышение температуры $\Delta T \geq 3$ °С и объяснила это дополнительной сорбцией метана в процессе разрушения угля. Результаты эксперимента не вызывают сомнения, однако объяснения не достаточно исчерпывающие, так как 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 мм², микросекунды), суммарный температурный эффект от движущегося ансамбля микротрещин может быть весьма значителен.

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–влага можно считать, что повышение температуры в очаге опасности ГДЯ, предположим на 100 °С, 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 не следует исключать и влияние других факторов: давления газа, горного давления, структуры угля и т.д.

По-видимому, следует согласиться с тем, что в зоне ГДЯ (т.е. непосредственно в полости) в момент теплового взрыва (возможно на короткое время) температура в локальных объёмах достигает 600-800 °С; об этом свидетельствуют показания специалистов-горняков, однако экспериментальные или документальные доказательства неизвестны.

Критическая температура в зоне ГДЯ. $T_{кр}$ – температура, при которой начинается спонтанный переход системы из метастабильного состояния в лабильное. Её значение для конкретных условий неизвестно (пределы примерно 600-800 °С). По мнению Н.Н. Семенова, оно может быть любым.

Трещиноватость угля. Экспериментально установлено (ИГТМ НАНУ), что угли, извлечённые из зоны выброса, обладают повышенной трещиноватостью: на 1 мм² находится примерно 1000 субмикротрещин; в 1 мм³ их более миллиона. При объёмном сжатии бла-

годаря 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.

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 [3] 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».

Пласт не является «мёртвым», во времени он эволюционирует. Скорость эволюции (т.е. изменения структуры во времени) определяется прежде всего горным давлением. Энтропия (т.е. мера беспорядка) возрастает, растёт диссипация энергии как основной источник устойчивости системы.

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 предельные размеры грушевидной ёмкости. По мнению авторов работы [4], этому способствует древовидный ансамбль трещин. Если же таких ансамблей будет несколько, то полость может приобретать причудливую форму.

Геометрические размеры полостей выбросов угля и газа не случайны, так как в основе их образования лежат термодинамические принципы и в том числе явление детерминированного хаоса. По мнению Д.И. Трубецкого [5], возникновение детерминированного хаоса в сложных динамических системах состоит в следующем. Если в фазовое пространство поместить динамическую систему, то её роль состоит в превращении случайности начальных условий в макроскопическую случайность движения системы. При существовании в системе локальной неустойчивости, когда близкие траектории расходятся экспоненциально, это движение определяется начальными условиями.

Следует подчеркнуть, что образом хаоса в фазовом пространстве является странный аттрактор; в хаосе есть некоторый порядок и всегда существуют универсальные сценарии возникновения хаоса. Один из сценариев перехода к хаосу через бесконечный каскад бифуркаций удвоения периода принадлежит Фейхенбауму (в науке о турбулентности известна его постоянная $\delta = 4,6692$). Известно также 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 экспериментальной проверки.

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, поскольку процесс их образования растянут во времени и влияние самых разных факторов, в том числе и таких, как тектонические землетрясения, проявляется в полной мере. Однако

образование полостей в процессе выброса будет подчиняться термодинамическим принципам, и, безусловно, геометрические размеры полости должны согласовываться с некоторыми универсальными постоянными.

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

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

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

Известно [1, 2], что спусковым механизмом возникновения ГДЯ являются внешние малые возмущения природного или техногенного характера. Вместе с тем такое утверждение (хотя оно и прочно установилось в литературе и считается неоспоримым фактом) все же не обладает полнотой, т.к. не учитывает все явления, происходящие в самой зоне ГДЯ. Рассмотрим эти явления более подробно с учётом того факта, что в зоне выброса во время коллапса всегда возникают несколько ядер с различной скоростью эволюции и газовыделения.

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

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

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

Такая симуляционная модель, т.е. модель, имитирующая физический процесс выброса при помощи искусственной термодинамической системы, была построена [1, 2] на основе имеющейся обширной (но все же недостаточной) экспериментальной информации и фундаментальных принципов нелинейной неравновесной термодинамики. О её важности для инженерной горной практики можно судить хотя бы по тому неоспоримому факту, что большинство результатов промышленных и лабораторных экспериментальных исследований укладываются в рамки и допущения этой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2013. – Вып. 108. – С. 3-31.
2. Булат, А.Ф. Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // Уголь Украины. – 2013. – № 12. – С. 24-33.
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. – К.: Наук. думка, 2010. – 423 с.
5. Алексеев, А.Д. Прогнозирование неустойчивости системы уголь–газ / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, В.Н. Чистоклетов. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2010. – 343 с.

REFERENCES

1. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2013), "Some problems of gas-dynamic phenomena in coal massif in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics", *Geo-technical Mechanics*, no. 108, pp. 3-31.
2. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2013), "Sudden coal and gas emissions in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics", *Coal of Ukraine*, no. 12, pp. 24-33.
3. Bulat, A.F., Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A. and Antsiferov, V.A. (2010), *Metanogeneratsiya v ugol'nykh plastakh* [Methane generation in coal seams], Lira Ltd., Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Alekseyev, A.D. (2010), *Fizika uгля i gornyykh protsessov* [Physics of coal and mining processes], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
5. Alekseyev, A.D., Starikov, G.P. and Chistokletov, V.N. (2010), *Prognozirovaniye neustoychivosti sistemy ugol'–gaz* [Prediction of instability of the coal-gas system], Knowledge, Donetsk, Ukraine.

Об авторах

Булат Анатолий Фёдорович, 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@gmail.com

Бокий Борис Всеволодович, доктор технических наук, директор по развитию ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», Донецк, Украина

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 Vitaliy 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@gmail.com

Bokiy Boris Vsevolodovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Development Director of PJSC "Mine named after A.F. Zasyad'ko", Donetsk, Ukraine

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

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

Abstract. Important observations on the model of gas-dynamic phenomena in the coal mass are formulated basing on modern concepts of nonlinear nonequilibrium thermodynamics. It is shown that some parts of the zone (the cores) feature different rates of the structure changes and gas release in area of outburst during the collapse. According to the authors, basic information parameters (pressure, methane generation speed, etc.) become asymmetric in zone of the outburst evolution and can result in formation of small perturbations which can inhibit the process generally leading to the thermal exposure. Thus, in addition to external perturbations of natural and technogeneuous character, small asymmetry of the core internal parameters can also cause starting the process of thermal explosion.

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

Статья поступила в редакцию 05.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Миневым