

САМОВОЗГОРАНИЕ ПЫЛИ БУРОГО УГЛЯ. ЭКСПЕРИМЕНТ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С. П. Амельчугов, В. И. Быков*, С. Б. Цыбенова**

Сибирский филиал ВНИИПО, 660036 Красноярск

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036 Красноярск

**Красноярский государственный технический университет, 660074 Красноярск
bykov@fivt.kgtu.runnet.ru

Создана экспериментальная установка и разработана методика исследования процессов самовозгорания и взрыва пыли бурого угля. Определены кинетические параметры (энергия активации и предэкспонент) для бурого угля Ирша-Бородинского месторождения. Экспериментально показано, что при определенных соотношениях уголь/окислитель наблюдается двухстадийный характер взрыва. Повторный взрыв пыли обусловлен термоактивацией угля на первом этапе взрыва. Приведен ряд математических моделей, качественно описывающих процессы самовозгорания пыли бурого угля.

Ключевые слова: бурый уголь, самовозгорание пыли, кинетические параметры, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Пожары и взрывы характерны для всех стадий обращения с углем, при этом самовозгорание является основной причиной пожаров на складах топлива и трактах углеподачи (50 ÷ 60 %), этим же вызван каждый шестой пожар на ТЭС или котельной.

Исследования [1–5] показывают, что способность углей к самовозгоранию существенно зависит от кинетических параметров этого процесса — энергии активации и предэкспонента. Установлено, что эти параметры изменяются при нагревании угля до температуры 500 ÷ 600 К, при этом его реакционная способность увеличивается, т. е. происходит термическая активация. В данной работе на основе экспериментального исследования взрыва угольной пыли в цилиндрическом сосуде показано, что после первого взрыва при определенном соотношении топливо/окислитель может произойти второй взрыв как следствие термоактивации угля на первом этапе. В качестве математических моделей использованы уравнения, описывающие материальный и тепловой баланс в реакторе идеального вытеснения. Расчеты, проведенные для кинетических параметров процесса самовозгорания бурого угля Ирша-Бородинского месторождения, показывают качественное согласие эксперимента и предложенных моделей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ

Кинетические параметры процессов самовозгорания определялись методом калориметрирования. Основу установки (рис. 1) состав-

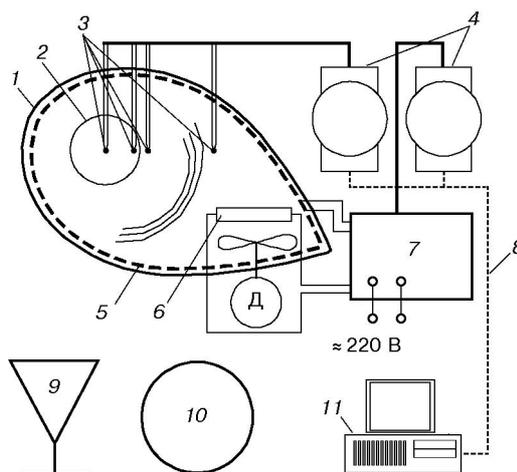


Рис. 1. Схема установки для определения кинетических параметров самовозгорания бурого угля:

1 — корпус термостата; 2 — реакционный сосуд; 3 — термопары; 4 — модули сбора данных и управления; 5 — основной нагреватель; 6 — вспомогательный нагреватель; 7 — модуль электропитания и управления; 8 — линия связи RS-485; 9 — весы; 10 — сушильный шкаф; 11 — ПЭВМ

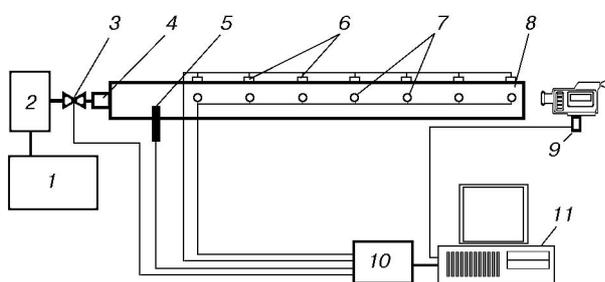


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по определению условий развития взрыва пыли натуральных топлив в протяженных каналах:

1 — компрессор; 2 — сосуд с сжатым воздухом; 3 — клапан; 4 — распылитель; 5 — источник зажигания; 6 — термодатчики; 7 — фотодиоды; 8 — взрывной канал; 9 — видеокамера; 10 — скоростной регистратор; 11 — ПЭВМ

лял суховоздушный термостат. Реакционный сосуд был выполнен в виде цилиндра, из тонкой латунной сетки. В ходе опытов с помощью хромель-алюмелевых термопар регистрировалась температура — не менее чем в четырех точках (в термостате, вблизи стенки, в центре и на границе реакционного сосуда).

Опыты проведены с углем свежедобытым, окисленным в воздухе (36 ч, что соответствует времени транспортировки) и термически активированным. Термическая активация происходила путем нагрева навески бурого угля в воздухе до возникновения признаков горения (обильное дымовыделение, появление зерен тления) и последующего охлаждения в инертной среде. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Установлено, что реакционная способность, а следовательно, и пожаро- и взрывоопасные свойства пыли бурого угля повышаются в ряду: окисленный — свежедобытый — термоактивированный.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПРОТЯЖЕННОМ КАНАЛЕ

Скорость распространения фронта горения пылевзвеси исследовали на экспериментальной установке, схема которой дана на рис. 2. Взрывной канал представлял собой стальную трубу диаметром 100 мм и длиной 2000 мм. Для создания равномерного пылевого облака внутри взрывной камеры использовался конусный распылитель с форсункой. Пыль

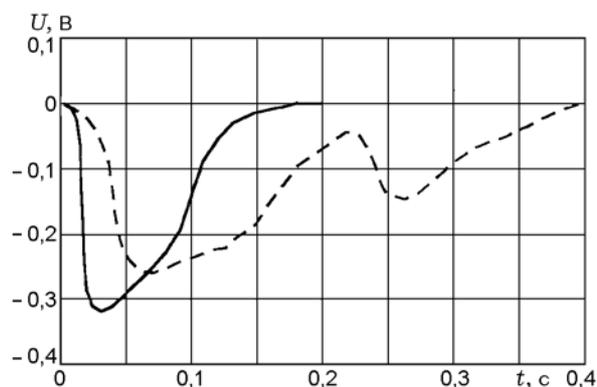


Рис. 3. Динамика сигнала фотодиодов при взрыве угольной пыли:

сплошная линия — активная пыль; штриховая — окисленная

воспламенялась за счет прохождения пылевзвеси через трубчатый нагреватель. Изменение температуры в ходе формирования и распространения фронта горения пылевзвеси по каналу регистрировалось с помощью распределенных по оси канала хромель-алюмелевых термопар. Показания термопар и фотодиодов фиксировались с помощью скоростного регистратора (интервал измерений $1 \div 10$ мс), отображались на экране цифрового осциллографа и записывались на магнитном носителе. Концентрацию пылевзвеси определяли по массе пробы пыли. Дополнительно велась скоростная видеосъемка динамики воспламенения пыли бурого угля при варьировании различных параметров процесса.

На рис. 3 показана динамика взрыва угольной пыли в соответствии с оптическими измерениями для проб угольной пыли (фракция до 80 мкм) различной степени окисленности. Соответствующие экспериментальные данные для пыли различных фракций и степени окисленности представлены в табл. 2. Анализ представленных данных показывает, что в процессе взрыва пыль бурого угля активизируется при термическом нагреве, становится более реакционноспособной, эффективная энергия активации самовозгорания уменьшается.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Использовались три достаточно простые модели, качественно описывающие процесс самовозгорания угольной пыли в цилиндрическом реакторе при различных теплофизических и физико-химических предположениях. Прежде

Таблица 1
Кинетические параметры процесса самовозгорания бурого угля
Ирша-Бородинского месторождения

Уголь	Энергия активации, кДж/моль	Предэкспонент, с ⁻¹
Свежедобытый	40,4	0,61 · 10 ⁸
Окисленный	53,2	0,84 · 10 ⁹
Активированный	35,0	0,62 · 10 ⁷

Таблица 2
Данные экспериментов по взрыву пыли бурого угля

Тип датчика	Характеристики угольной пыли		Среднее время достижения максимума, мс
	Фракция, мкм	Окисленность*	
Фотоэлектрический	< 80	А	27
	< 80	О	60
	80–160	А	45
Термоэлектрический	< 80	А	390
	80–160	А	430
	80–160	О	460
	160–180	А	350

Примечание. *А — активная угольная пыль, О — окисленная угольная пыль.

всего, это режим идеального вытеснения в трубе, при этом рассматривались одномерные стационарные профили распределения температуры и концентраций по длине реактора. Кроме него изучались также режимы самовозгорания при избытке кислорода с учетом его существенного изменения. Специально выделен случай самовозгорания с учетом так называемой термоактивации угля. В двух первых случаях схема процесса одностадийная, в третьем — трехстадийная. Целью моделирования являлось качественное описание основных особенностей процесса самовозгорания угольной пыли, выявление физико-химических и теплофизических параметров, определяющих условия самовозгорания.

Схема реакции X → П (уголь → продукт). Математическая модель реактора идеального вытеснения, в котором осуществляется единственная экзотермическая реакция, в стационарном случае включает уравнения материального и теплового балансов [6, 7]:

$$u \frac{dX}{dl} = -k(T)X, \quad (1)$$

$$c_p \rho u \frac{dT}{dl} = (-\Delta H)k(T)X + \frac{4h}{d}(T_w - T),$$

где

$$k(T) = k^0 \exp(-E/RT) \quad (2)$$

— константа скорости реакции; k^0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — текущая температура; X — текущая концентрация угольной пыли; T_w — температура стенки реактора; l — переменная длина реактора; h — коэффициент теплопередачи от стенки реактора в его объем; d — диаметр реактора; ρ , c_p , u — плотность, теплоемкость и скорость подачи реакционной смеси соответственно; $(-\Delta H)$ — тепловой эффект реакции. Длина реактора меняется в пределах

$$0 \leq l \leq l_f, \quad (3)$$

где l_f — общая длина цилиндрического реактора. Условия на входе в реактор задаются в виде

$$X(0) = X^0, \quad T(0) = T_0, \quad (4)$$

где X^0 , T_0 — концентрация и температура реакционной смеси на входе в реактор. В модели (1) принят первый порядок реакции и предполагается, что процесс идет при избытке кислорода, что в случае малых концентраций угольной пыли вполне допустимо в качестве первого приближения.

Расчеты по модели (1) проведены при следующих значениях параметров: $k^0 = 8,4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, $E = 53200 \text{ Дж/моль}$, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$, $(-\Delta H) = 900 \text{ Дж/моль}$, $T_w = 283 \text{ К}$, $T_0 = 325 \text{ К}$, $X^0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$, $l_f = 200 \text{ см}$, $d = 10 \text{ см}$, $\rho = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$, $c_p = 1,13 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$, $u = 100 \text{ см/с}$, $h = 0,006 \text{ Дж/(см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$. Найлены условия самовозгорания угольной пыли при изменении значений T_0 , X^0 , h , T_w , u . Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 4.

Интересно отметить высокую чувствительность условий самовозгорания, положения и температуры «горячей точки» от условий на входе в реактор и условий теплообмена: при некотором критическом значении варьируемого параметра достаточно плавный ход температуры сменяется резким ее подъемом, что можно характеризовать как тепловой взрыв угольной пыли в трубе. Пример такого стационарного распределения температуры по длине реактора дан на рис. 4, где в качестве варьируемого параметра выступает температура на входе в реактор. Аналогичный эффект наблюдается и при варьировании температуры стенки реактора. Таким образом, модель (1)–(4) качественно описывает рассматриваемое явление и может быть принята в качестве простейшей модели самовозгорания угольной пыли в трубе.

Схема реакции $O_2 + X \rightarrow П$. Если при моделировании процесса горения приходится учитывать изменение концентрации окислителя, то систему (1)–(4) надо модифицировать:

$$u \frac{dX}{dl} = -k(T)X \cdot O_2,$$

$$u \frac{dO_2}{dl} = -k(T)X \cdot O_2, \quad (5)$$

$$c_p \rho u \frac{dT}{dl} = (-\Delta H)k(T)X \cdot O_2 + \frac{4h}{d}(T_w - T).$$

Здесь кинетика отвечает уже реакции второго порядка, O_2 — концентрация кислорода. Для

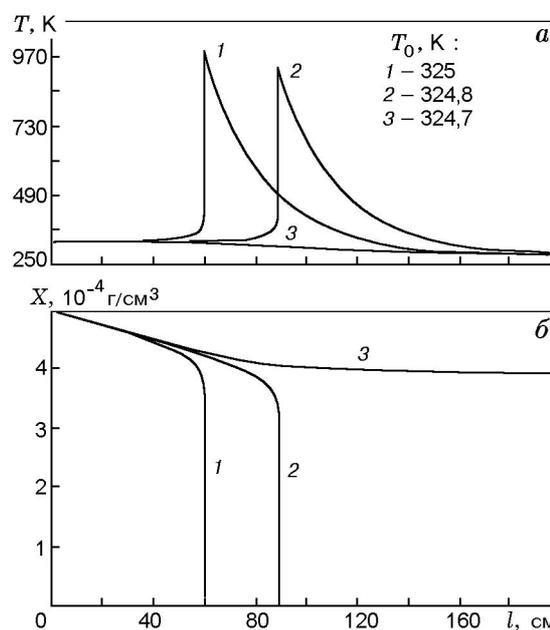


Рис. 4. Профили температуры (а) и концентрации угольной пыли (б) в цилиндрическом реакторе при варьировании температуры на входе в реактор

системы (5) обозначения переменных и параметров аналогичны приведенным выше, условия (2)–(4) те же. Характерные профили концентраций угля, кислорода и температуры при различных концентрациях O_2 на входе в реактор представлены на рис. 5 при следующем наборе параметров: $k^0 = 0,84 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $E = 53200 \text{ Дж/моль}$, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$, $(-\Delta H) = 900 \text{ Дж/моль}$, $T_w = 300 \text{ К}$, $T_0 = 310 \text{ К}$, $X^0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$, $u = 100 \text{ см/с}$, $h = 0,006 \text{ Дж/(см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$. Здесь предэкспоненциальный множитель k^0 отличен от аналогичного значения для рассмотренной выше схемы. Это объясняется тем, что кинетические параметры отвечают разным условиям: выше рассматривалась реакция в предположении постоянства кислорода, а в системе (5) его изменение учитывается.

Расчеты показывают, что степень выгорания угля существенно зависит от содержания окислителя. При достаточном количестве кислорода температура вблизи от входа в реактор резко возрастает, что можно характеризовать как интенсивное самовозгорание угольной пыли. При снижении концентрации O_2 на входе в реактор профили температуры становятся более пологими и характерное время изменения

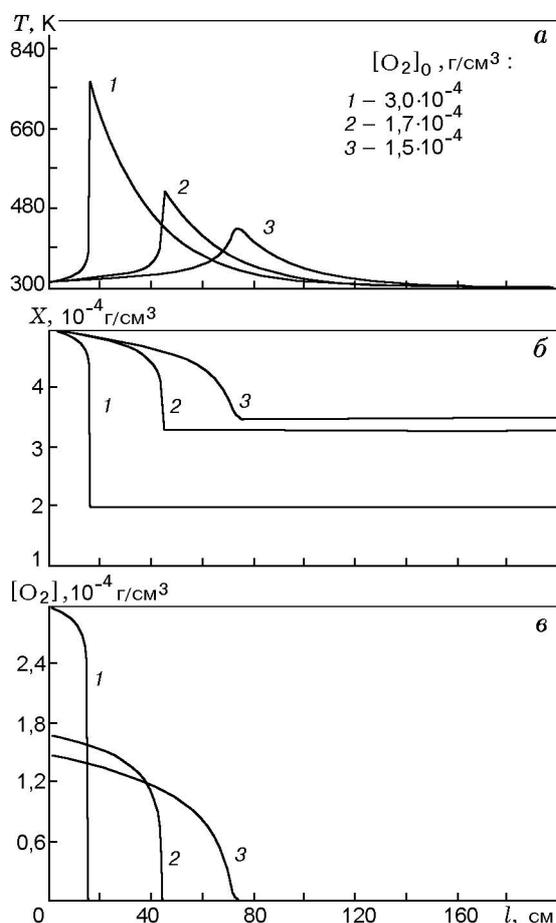
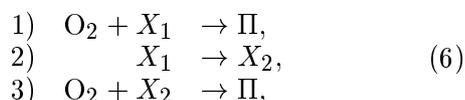


Рис. 5. Профили температуры (а) и концентраций угольной пыли (б) и кислорода (в) при варьировании концентрации окислителя на входе в реактор

концентраций реагентов возрастает. Таким образом, концентрация окислителя является одним из определяющих факторов процесса самовозгорания пыли бурого угля.

Трехстадийная схема с термоактивацией.

Физико-химические исследования показывают, что при нагревании уголь может активироваться, т. е. его способность к самовозгоранию увеличивается за счет снижения энергии активации в (2). Поэтому наряду с рассмотренными выше одностадийными реакциями мы исследуем трехстадийную схему:



где X_1 , X_2 — исходный и активированный уголь соответственно. Стадия 1 отвечает рас-

смотренной выше реакции окисления угля, стадия 2 — процессу активации угля (переходу исходного угля X_1 в активированную форму X_2), стадия 3 — реакции окисления активированного угля. Энергия активации этой реакции значительно меньше энергии активации первой стадии. Схеме (6) отвечает термокинетическая модель:

$$\begin{aligned} u \frac{dX_1}{dl} &= -k_1(T) \text{O}_2 X_1 - k_2(T) X_1, \\ u \frac{dX_2}{dl} &= k_2(T) X_1 - k_3(T) \text{O}_2 X_2, \\ u \frac{d\text{O}_2}{dl} &= -k_1(T) \text{O}_2 X_1 - k_3(T) \text{O}_2 X_2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} c_p \rho u \frac{dT}{dl} &= (-\Delta H_1) k_1(T) \text{O}_2 X_1 + \\ &+ (-\Delta H_2) k_2(T) X_1 + \\ &+ (-\Delta H_3) k_3(T) \text{O}_2 X_2 + \frac{4h}{d} (T_w - T), \end{aligned}$$

где $k_i(T)$, $i = 1, 2, 3$, — константы скоростей стадий 1–3 (см. (6)); $(-\Delta H_i)$, $i = 1, 2, 3$, — тепловые эффекты этих реакций. Возможные профили концентраций реагентов и температуры показаны на рис. 6. В расчетах принимались следующие значения кинетических и теплофизических параметров: $k_1^0 = 0,84 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $k_2^0 = 1200 \text{ с}^{-1}$, $k_3^0 = 0,62 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $E_1 = 53200 \text{ Дж/моль}$, $E_2 = 20000 \text{ Дж/моль}$, $E_3 = 40000 \text{ Дж/моль}$, $(-\Delta H_1) = 900 \text{ Дж/моль}$, $(-\Delta H_2) = 400 \text{ Дж/моль}$, $(-\Delta H_3) = 1100 \text{ Дж/моль}$, $T_w = 300 \text{ К}$, $T_0 = 310 \text{ К}$.

Первый пик температуры на рис. 6 отвечает самовозгоранию исходного угля. При этом кислород выгорает полностью и горение пыли прекращается. На первом участке горения концентрация активированного угля растет, далее до середины длины цилиндрического реактора она стабилизируется. При $l \approx 60 \text{ см}$ наблюдается резкое, но небольшое по амплитуде изменение концентрации X_2 , что говорит о горении активированного угля, которое быстро прекращается из-за отсутствия окислителя. Новая порция окислителя подается в середине реактора ($l = 100 \text{ см}$), что приводит к вторичной вспышке угольной пыли; при этом горит уже активированный уголь.

Как и для одностадийных схем реакций, для модели (7) характерна высокая чувствительность режимов горения и условий воспламенения к входным условиям и условиям теплообмена с окружением. Трехстадийная схема

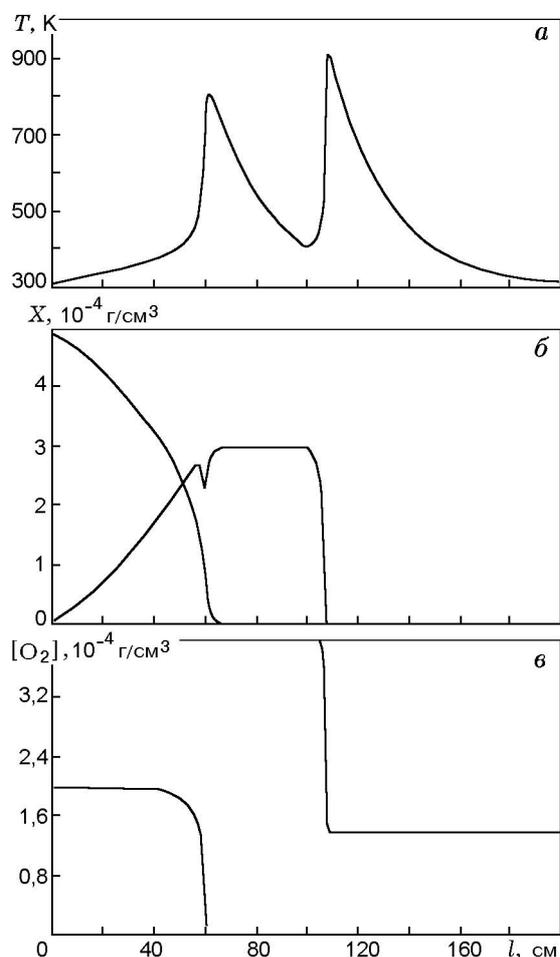


Рис. 6. Профили температуры (а) и концентраций угольной пыли (б) и кислорода (в) для трехстадийной схемы с термоактивацией

(6) с учетом термоактивации угля позволяет качественно описывать в рамках достаточно простой модели (7) процесс повторного самовозгорания угольной пыли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования качественно соответствуют наблюдаемым экспериментальным данным. Задача их количественного описания в рамках рассматриваемых моделей в данной работе не ставилась. Поэтому мы здесь не приводим детальных статистических характеристик эксперимента. При расчетах стандартные теплофизические параметры брали из работ [8–10], кинетические параметры E , k^0 для газозвеси угля — из [2, 5].

Проведенные экспериментальные исследо-

вания и математическое моделирование самовозгорания пыли бурого угля позволяет выявить основные факторы, определяющие критические условия горения. В первую очередь, пожаровзрывоопасность угольной пыли обусловлена кинетикой процессов ее самовозгорания, воспламенения и распространения взрыва. Это имеет важное значение для практического использования. Одной из особенностей взрывов пылеугольной смеси на объектах теплоэнергетики является наличие повторных взрывов (хлопков) во взвихренной смеси. Такие взрывы происходят и при введении огнетушащих средств, при резком изменении направления и скорости движения воздушных потоков и т. д. Если в определенный момент времени сложились условия для воспламенения, то одновременно при наличии горючей среды и окислителя (кислород воздуха) возникает источник зажигания. Возгорание этой смеси происходит в режиме дефлаграционного горения. При этом проявляются опасные факторы горения: образуются продукты горения, возрастает объемная температура, активизируется угольная пыль.

Отсюда следует важный вывод о том, что для предотвращения воздействия опасных факторов взрыва на объекты необходимо управлять этими процессами. Однако в настоящее время основу взрывопожарной защиты предприятий топливноэнергетики составляют пассивные системы (легкосбрасываемые конструкции, взрывные клапаны, заполнения оконных проемов и т. д.), которые не способны обеспечить эффективное предотвращение аварий в трактах углеподачи. Решению этой проблемы может способствовать математическое моделирование процессов самовозгорания угольной пыли. Детальные расчеты макрокинетики этих процессов при варьировании параметров в широких пределах позволят создать научно обоснованные методики и нормативы оценки пожаро- и взрывобезопасности трактов углеподачи на современных энергетических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев Я. С., Киселев В. Я., Амелчугов С. П. Условия самовозгорания восточных углей // Пожаровзрывобезопасность. 1992. № 3. С. 7–21.
2. Амелчугов С. П. Влияние диоксида углерода на процесс самовозгорания бурых углей // Пожаровзрывобезопасность. 1992. № 2. С. 25–27.

3. Захаренко Д. М., Амельчугов С. П. Автоматизированная система взрывоподавления и противопожарной защиты трактов топливоподдачи Абаканской ТЭЦ // Сиб. вестн. пожарной безопасности. 1999. № 2. С. 42–47.
4. Амельчугов С. П., Быков В. И., Цыбенова С. Б. Моделирование зажигания угольной пыли в трубчатом реакторе // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск: СибВТИ, 2000. С. 320–321.
5. Амельчугов С. П. Теплофизические характеристики самовозгорания бурых углей и способы ее ликвидации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: КГТУ, 1996.
6. Цыбенова С. Б. Параметрический анализ базовых моделей теории химических реакторов и теории горения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: КГТУ, 1999.
7. Быков В. И., Цыбенова С. Б. Параметрический анализ некоторых базовых моделей теории горения // Химическая физика процессов горения: Сб. тр., посвященный 70-летию акад. РАТН Г. И. Ксандопуло. Алматы, 1999. С. 133–135.
8. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1977.
9. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Шатиль А. А. Топочные процессы и устройства (исследование и расчет). СПб: АООТ «НПО ЦКТИ», 1997.

Поступила в редакцию 7/V 2001 г.
