

УДК 662.612:32

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ СМЕСИ МЕТАН/ВОДОРОД/МИКРОЧАСТИЦЫ УГЛЯ

Д. А. Тропин, А. В. Фёдоров

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
d.a.tropin@itam.nsc.ru

Разработана физико-математическая модель воспламенения и горения метановоздушной смеси в присутствии микрочастиц угля, учитывающая детальную кинетику окисления газовой смеси метан/водород/воздух и процессы термической деструкции частиц угля с выходом летучих (метан и водород) в газовую фазу, воспламенение и горение летучих в газовой фазе и гетерогенную реакцию окисления углерода. Показано, что добавление частиц угля в метановоздушную смесь в диапазоне температуры $900 \div 1450$ К уменьшает ее время задержки воспламенения. Кроме того, добавление частиц угля в метановоздушную смесь приводит к смещению предела воспламенения газовой смеси в сторону более низких температур. Получено удовлетворительное соответствие расчетных данных по времени задержки воспламенения угля в смеси воздух/уголь и по времени задержки воспламенения метана и угля в смеси метан/воздух/уголь с экспериментальными данными, полученными на установке быстрого сжатия.

Ключевые слова: воспламенение, метановодородовоздушная смесь, микрочастицы угля, детальная химическая кинетика, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20180605

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы воспламенения угольных аэрозвесей определяется широким использованием таких сред в качестве топливных смесей в разного рода энергетических установках, вопросами обеспечения взрыво- и пожаробезопасности в угледобывающей и энергетической отраслях промышленности и другими причинами.

Обширный опытный материал по характеристикам воспламенения одиночных относительно крупных (радиусом более 20 мкм) частиц угля в условиях слабой конвекции окисляющего газа в реакционной камере содержится в монографии [1]. Ниже мы остановимся лишь на некоторых работах по тематике исследования.

В [2] исследовали воспламенение облака частиц угля в нагретом ударной волной (УВ) окислителе. Определены необходимые для воспламенения температура газа и давление. Установлена их связь с температурой воспламенения частицы, которая зависит от содержания в угле летучих и находится в соот-

ветствии с температурой, при которой частицы теряют летучие вещества со значительной скоростью. Измерены времена задержки воспламенения угля различных марок и размеров частиц при давлениях окислителя от $1 \div 5$ до 30 атм и температурах $700 \div 1600$ К.

В [3] приведены результаты экспериментального исследования динамики образования и особенностей воспламенения в УВ газовзвесей угольной пыли дисперсностью не более 40 мкм с содержанием летучих 9, 26 и 55 %. Определены задержки воспламенения угольной пыли в воздухе и чистом кислороде в диапазоне чисел Маха падающей УВ в диапазоне $2.6 \div 4$. Установлено, что на величину периода индукции, а также на характер ее зависимости от температуры газа за УВ существенное влияние, наряду с кинетикой воспламенения летучих, оказывает кинетика выхода летучих.

Работа [4] посвящена экспериментальному исследованию времени задержки воспламенения угольной пыли в отраженных и падающих УВ. Предложена физическая модель нагрева газа при нестационарном взаимодействии сверхзвукового течения с облаком дисперсной фазы. Режим воспламенения наблюдался в узком интервале статических температур ($1200 \div 1350$ К) за проходящей УВ, что

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-58-00052-Бел-а).

© Тропин Д. А., Фёдоров А. В., 2018.

соответствовало числам Маха $M = 4.3 \div 4.6$. Отмечены некоторые особенности исследуемого процесса. Во-первых, воспламенение наблюдалось только в существенно плотных облаках мелкодисперсной пыли (плотностью более 3 кг/м^3) или при добавлении крупнодисперсных (диаметром более 100 мкм) частиц угля, оргстекла или песка в мелкодисперсную пыль. Во-вторых, точка воспламенения располагалась внутри облака дисперсной фазы, но не на передней кромке облака. При этом авторы указывают на главенствующую роль в процессе мелкодисперсных частиц диаметром примерно 1 мкм.

В [5] представлены результаты экспериментального исследования воспламенения стехиометрической метановоздушной смеси в присутствии угольных частиц диаметрами $20 \div 32$ мкм в диапазонах температуры $950 \div 1050$ К и давления $1.5 \div 2.0$ МПа, создаваемых с помощью установки быстрого сжатия (УБС). Обнаружено, что возгорание частиц происходит при температуре окислительной среды выше 850 К. При температуре выше 1000 К горящие частицы уменьшают время и предельную температуру воспламенения метановоздушной смеси.

В [6] обсуждены возможные сценарии воспламенения и развития взрыва в шахтах. В частности, показано, что добавление угольной пыли в метановоздушную смесь может привести к сдвигу предела воспламенения смеси в сторону более низкой температуры. Кроме того, экспериментально показана возможность гашения детонации в метановоздушной смеси завесой из инертных частиц. Отметим, что нами ранее [7] уже были рассмотрены подобные вопросы подавления и гашения детонационных волн в метановоздушных смесях инертными частицами. Более того, в [7] были рассчитаны концентрационные (по объемной концентрации частиц) пределы распространения детонационных волн в метановоздушной и метановодородовоздушной смесях.

Теоретическому изучению проблемы воспламенения угольных аэрозвесей посвящено достаточно много работ. В исследованиях, выполненных в рамках точечных моделей воспламенения угольных частиц и их аэрозвесей, для формулировки критических условий воспламенения/погасания широко использовались положения теории теплового взрыва Н. Н. Семенова [8–10].

Так, в работе [8] сравнивались кинетические схемы горения, полученные в двух типах экспериментов по горению угольных частиц (с размером не более 500 мкм). Первый тип экспериментов относится к регистрации скоростей горения в диапазоне температур частицы $900 \div 2200$ К. В экспериментах второго типа измеряли минимальную температуру газа, при которой воспламеняется уголь, при температуре частиц $750 \div 1350$ К. Показано, что упомянутые две схемы кинетики дополняют друг друга по таким параметрам, как массовая поверхностная скорость реакции, зависимости температуры газа и разницы температур частицы и газа при воспламенении от размера частицы.

В [9], следуя тепловой теории воспламенения, исследованы критические режимы воспламенения частиц угля и получено, что 1) сферические частицы не воспламеняются в газовой фазе, если процесс пиролиза не продолжает развиваться с интенсивностью, достаточной, чтобы держать пламя вдали от эндотермической угольной поверхности; 2) сферическая угольная частица не воспламеняется гетерогенно в том случае, когда скорость химического выделения тепла недостаточна для поддержания баланса со скоростью тепловых потерь в окружающую среду.

В [10] изучено динамическое поведение одиночных угольных частиц в горячей окислительной среде. Теоретические результаты показывают, что история частицы в течение ее выгорания включает в себя сложное взаимодействие конвективных, диффузионных и термохимических явлений. Получены аналитические выражения и представлены численные результаты для скорости выгорания углерода, показывающие относительное влияние газофазной химии, газофазного конвективного и диффузионного переноса и кинетики гетерогенной реакции на суммарную скорость реакции.

Для работ, выполненных на основе распределенного подхода [11, 12], характерным является описание процессов тепло- и массообмена либо в газовой среде вокруг одиночной реагирующей частицы [11], либо в потоке двухфазной смеси [12]. В обоих случаях воспламенение и горение обычно рассматривались как единый процесс реагирования.

В работе [11] анализировалось гетерогенное воспламенение угольной суспензии, ограниченной двумя параллельными изотермиче-

скими стенками. Предполагалось, что выделение тепла происходит на поверхности частиц в результате протекания гетерогенной реакции $C + (1/2)O_2 = CO$, подчиняющейся закону Аррениуса с большой энергией активации. Система уравнений состоит из уравнения в частных производных, описывающего баланс энергии частиц, и соотношения, связывающего радиационный поток с температурой частицы и моделирующего среду как серое нерассеивающее тело. Граничные условия для поля температуры дисперсной фазы соответствуют рассмотрению ограничивающих стенок как черных тел. Для газовой фазы принят точечный подход для описания ее параметров. Авторами определены критические условия воспламенения на основе квазистационарного подхода. Объяснено влияние таких параметров, как отношения температур газа и стенки, размера реагирующего облака к оптической длине, параметра кондукции/радиации.

В [12] исследовалось горение одиночных твердых сферических частиц углерода в неподвижной газовой смеси, состоящей из кислорода, монооксида углерода, диоксида углерода, пара, водорода и азота. Проведено моделирование динамической истории холодной углеродной частицы, мгновенно погружаемой в горячую окислительную среду. Установлено, что история частицы включает в себя три фазы. При вполне определенной критической температуре происходит воспламенение и частица быстро нагревается до температуры, превышающей температуру окружающего газа на величину, которая зависит от размера частицы и давления. Далее устанавливается длительный период горения частицы при приблизительно постоянной температуре. В последний период происходит полное расходование массы частицы и либо увеличение, либо уменьшение ее температуры.

Для моделирования течений угольных аэрозольных систем привлекались также уравнения механики гетерогенных сред в том или ином приближении. Так, в [13, 14] изучались вопросы о подъеме и воспламенении частицы угля в поле течения за проходящей УВ. Описание динамики частицы проведено на основе разработанной точечной математической модели воспламенения угольной частицы с использованием представления теории приведенной пленки. Данная модель верифицирована по экспериментальным данным о траекториях и зависимо-

стям времени задержки воспламенения частицы угля от температуры газа за фронтом УВ. Выявлены качественные и количественные особенности динамики и воспламенения частицы угля.

В данной работе предложена физико-математическая модель воспламенения и горения метановоздушной смеси в присутствии микрочастиц угля, учитывающая детальную кинетику окисления газовой смеси метан/водород/воздух и процессы термической деструкции частиц угля с выходом летучих (метан и водород) в газовую фазу, воспламенение и горение летучих в газовой фазе и гетерогенную реакцию окисления углерода. Проведено сопоставление расчетных данных по времени задержки воспламенения угля в смеси воздух/уголь и по времени задержки воспламенения метана и угля в смеси метан/воздух/уголь с экспериментальными данными, полученными на установке быстрого сжатия.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим пространство, заполненное газозвесью микрочастиц угля диаметрами $26 \div 52$ мкм в воздухе или в метановоздушной смеси, при высоких начальных параметрах состояния (температура $850 \div 1450$ К, давление $1 \div 19$ атм). Предполагается, что в газозвеси одновременно протекают процессы термической деструкции частиц угля с выходом летучих в газовую фазу, воспламенение и горение летучих в газовой фазе, гетерогенная реакция окисления углерода и воспламенение и горение метановоздушной смеси.

Летучие вещества в газовой фазе состоят из реагирующих летучих (H_2 , CH_4 , смолы и более сложных углеводородов) и инертных летучих (CO_2 и H_2O) [15, 16]. Известно, что доля реагирующих летучих в общей массе летучих составляет порядка 90 %, из которых около 85 % приходится на метан и водород [15]. Таким образом, для простоты, во-первых, будем считать, что реагирующие летучие состоят только из метана и водорода, и, во-вторых, будем пренебрегать процессами выхода инертных летучих.

Долю реагирующих летучих в общей массе летучих определим по эмпирическому соотношению [16]

$$\xi_{12}^* = 0.033 + 5.94\xi_{22,0} - 11.3\xi_{22,0}^2,$$

где $\xi_{22,0}$ — начальное массовое содержание летучих в топливе. В зависимости от марки угля начальное массовое содержание летучих в нем изменяется в пределах $28 \div 44$ % [17]. Поэтому в качестве начального массового содержания летучих в топливе возьмем осредненное значение $\xi_{22,0} = 0.36$.

Массовую скорость реакции пиролиза определим, как и в работах [16, 18], в виде следующей диффузионно-кинетической зависимости:

$$w_\nu = K_\nu \rho_{22} \left/ \left(1 + \frac{d}{6} \frac{K_\nu}{K_{\nu D}} \right) \right.,$$

где $K_\nu = k_\nu \exp(-E_\nu/T_2)$ — кинетическая константа скорости реакции пиролиза, $K_{\nu D} = D_\nu/d$ — диффузионная константа скорости реакции пиролиза. Значения констант k_ν , E_ν , D_ν приведены в работах [16, 18, 19].

Окисление твердого углерода (кокса) будем описывать одностадийной необратимой брутто-реакцией вида $\nu_{23}C + \nu_{O_2}O_2 \rightarrow \nu_{CO_2}CO_2$, где стехиометрические коэффициенты таковы: $\nu_{23} = 1$, $\nu_{O_2} = 1$, $\nu_{CO_2} = 1$.

Скорость реакции окисления твердого углерода будем описывать, как и в работе [16], следующей диффузионно-кинетической зависимостью:

$$w_2 = K_B \xi_{O_2} (\rho_{23} - \rho_{23,c}) \left/ \left(1 + \frac{d}{6} \frac{K_B}{K_D} \right) \right.,$$

где $K_B = k_B \exp(-E_B/T_2)$ — кинетическая константа скорости реакции окисления кокса, $K_D = Nu D_{O_2}/d$ — диффузионная константа скорости реакции окисления кокса, $\rho_{23,c} = 0.1\rho_{23,0}$ — плотность несгоревшего кокса, $\rho_{23,0}$ — начальная плотность кокса, ξ_{O_2} — массовая концентрация кислорода, Nu — число Нуссельта. Значения констант k_B , E_B , D_{O_2} приведены в работах [16, 18, 19].

В данной модели летучие в газовом состоянии состоят только из метана и водорода, которые, в свою очередь, являются одними из основных компонентов детальной кинетики окисления метана, представленной ниже. Поэтому окисление летучих будем описывать той же кинетикой, что и окисление метановоздушной смеси.

Таким образом, система уравнений, описывающая воспламенение и горение газозвеси микрочастиц угля в воздухе и в метановоздушной смеси, имеет следующий вид.

1. Законы сохранения массы. Изменение средних плотностей компонентов газозвеси в результате протекания гетерогенных (воспламенение и горение кокса) и гомогенных (воспламенение и горение летучих и метановоздушной смеси) химических реакций описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \xi_{12}^* w_\nu + \bar{\nu}_{23} w_2, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_{22}}{dt} = -\xi_{12}^* w_\nu, \quad \frac{d\rho_{23}}{dt} = -\bar{\nu}_{23} w_2,$$

где индексы 1 — реагирующая газовая смесь (летучие в газообразном состоянии и метановоздушная смесь), 22 — летучие в твердом состоянии, 23 — твердый углерод (кокс). Средняя плотность газозвеси сохраняется: $\rho = \rho_1 + \rho_{22} + \rho_{23} = \text{const}$.

Выход летучих, расход кислорода на окисление кокса и выделение углекислого газа за счет гетерогенной реакции воспламенения и горения кокса описываются системой уравнений:

$$\frac{d\rho_{O_2}}{dt} = -\bar{\nu}_{O_2} w_2, \quad \frac{d\rho_{CO_2}}{dt} = \bar{\nu}_{CO_2} w_2, \\ \bar{\nu}_{23} + \bar{\nu}_{O_2} = \bar{\nu}_{CO_2}, \quad \bar{\nu}_i = \nu_i \mu_i, \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_{CH_4}}{dt} = \alpha_{22} \xi_{12}^* w_\nu, \quad \frac{d\rho_{H_2}}{dt} = (1 - \alpha_{22}) \xi_{12}^* w_\nu.$$

Здесь ν_i — стехиометрический коэффициент компонента i в реакции окисления кокса, μ_i — молярная масса компонента i в реакции окисления кокса, α_{22} — аккомодационный коэффициент, определяющий долю метана в газообразных реагирующих летучих. Отметим, что система уравнений (2) описывает изменение средних плотностей (а вместе с этим и относительных массовых концентраций) компонентов реагирующей газовой смеси (H_2 , CH_4 , CO_2 , O_2). В данном случае система (2) является частью (слагаемыми в правой части соответствующих уравнений) системы уравнений детальной кинетики для реагирующей газовой смеси, описанной ниже.

2. Законы сохранения энергии. Эти законы для газобразной и твердой фаз имеют вид:

$$\rho_1 c_{v,1} \frac{dT_1}{dt} = Q_{ch} + \alpha_q q_2 w_2 - |\alpha_l| L w_\nu + Q_{12}, \quad (3)$$

$$\rho_{23} c_{v,2} \frac{dT_2}{dt} = (1 - \alpha_q) q_2 w_2 - (1 - |\alpha_l|) L w_\nu - Q_{12},$$

Здесь

$$Q_{ch} = - \sum_{i=1}^{15} (c_{v,1i}T_1 + h_{0,i} - c_{p,1i}T_{00}) \frac{d\xi_i}{dt} —$$

тепловыделение за счет воспламенения и горения реагирующей газовой смеси (газообразных летучих и метановоздушной смеси); $q_2 = q_{2,0} + (c_{p,O_2} - c_{p,CO_2})(T_1 - T_0) + c_{p,2}(T_2 - T_0)$ — тепловыделение за счет воспламенения и горения твердого углерода (кокса);

$L = L_0 + \xi_{12}^*(\xi_{CH_4}c_{p,CH_4} + \xi_{H_2}c_{p,H_2})(T_1 - T_0) - c_{p,2}(T_2 - T_0)$ — теплопоглощение за счет реакции пиролиза (выхода летучих); $Q_{12} =$

$-\frac{6\lambda Nu}{d^2}(T_1 - T_2)$ — теплообмен между фазами;

$q_{2,0} = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг; $L_0 = -1.9 \cdot 10^6$ Дж/кг;

$c_{v,1} = \sum_{i=1}^{15} c_{v,1i}(T_1)$; $c_{v,2} = 1200$ Дж/(кг·К);

$c_{v,1i}(T_1)$ — зависимости теплоемкости при постоянном объеме компонента i реагирующей газовой смеси от температуры газа, которые были взяты из NIST Chemistry WebBook [20]; T_0 — начальная температура газозвеси; α_q — доля тепла, выделяющегося в газовой смеси за счет реакции горения кокса; α_l — доля тепла, поглощаемого из газовой смеси при выходе летучих из твердой частицы.

Система (1)–(3) замыкается уравнением состояния для газовой смеси в целом

$$p = \rho_1 T_1 R \sum_{i=1}^{15} \frac{\xi_i}{\mu_i} \quad (4)$$

и уравнениями детальной кинетики для газовой смеси

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \frac{1}{\rho_1} \mu_i \sum_{r=1}^l \left\{ \rho_1^{m_r} (\nu'_{ir} - \nu_{ir}) \times \right. \\ \left. \times \left[k_{fr} \prod_{\beta=1}^{15} \left(\frac{\xi_\beta}{\mu_\beta} \right)^{\nu_{\beta r}} - k_{br} \prod_{\beta=1}^{15} \left(\frac{\xi_\beta}{\mu_\beta} \right)^{\nu'_{\beta r}} \right] \right\}. \quad (5)$$

Здесь k_{fr} , k_{br} — скорости прямых и обратных реакций; l — количество реакций; m_r — порядок r -й реакции; ξ_β — концентрация компонента смеси β ; ν_{ir} , $\nu_{\beta r}$ — стехиометрические коэффициенты, равные 1, если соответствующий компонент участвует в r -й реакции, и 0 в противоположном случае; ν'_{ir} , $\nu'_{\beta r}$ — стехиометрические коэффициенты, относящиеся к продуктам реакции.

3. Кинетика окисления летучих и метановоздушной смеси. Для описания кинетики воспламенения и горения газообразных летучих и метановоздушной смеси используем упрощенную детальную кинетическую схему [21], которая учитывает 92 прямые и обратные реакции пятнадцати компонентов (H_2 , O_2 , H_2O , OH , O , H , HO_2 , H_2O_2 , CH_4 , CH_3 , CH_3O , CH_2O , HCO , CO_2 , CO). Упрощение, а также подробное описание данной модели кинетики приведены в работе [7]. Здесь отметим, что ранее с помощью данной модели кинетики нами были описаны процессы распространения, ослабления и подавления детонации в смесях метан/кислород и метан/водород/кислород [7], экспериментально наблюдаемые времена задержки воспламенения газозвеси частиц железа в метановоздушной смеси [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Газозвесь микрочастиц угля в воздухе. Рассмотрим процессы воспламенения микрочастиц угля в воздухе. Для начала определим критерии воспламенения твердых частиц. Одним из них является время достижения максимума роста температуры частиц во времени [22, 23] —

$$\max \left(\frac{dT_2}{dt} \right) \quad (\text{критерий 1a}).$$

Отметим также, что аналогичный критерий воспламенения существует для чистой реагирующей газовой смеси [24–26]: время достижения максимума роста температуры газовой смеси во времени —

$$\max \left(\frac{dT_1}{dt} \right) \quad (\text{критерий 1б}).$$

В данной работе этот критерий мы будем использовать для определения времени задержки воспламенения метановоздушной смеси.

Следует также заметить, что при достижении максимума градиента температуры частиц во времени скорость реакции окисления частиц практически достигает своего максимального значения, а средняя плотность частиц уменьшается практически в два раза от начальной. Поэтому введем еще два критерия воспламенения твердых частиц: время достижения максимального значения скорости реакции окисления частицы, т. е. момент времени,

при котором достигается минимум градиента средней плотности, —

$$\min \left(\frac{d\rho_{23}}{dt} \right) \quad (\text{критерий 2});$$

время полувыгорания твердой частицы —

$$0.5(\rho_{23,0} - \rho_{23,c}) \quad (\text{критерий 3}).$$

На рис. 1 приведены для сопоставления времена задержки воспламенения газозвеси частиц угля диаметром 26 мкм с объемной концентрацией $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$, определенные по этим трем критериям воспламенения. Видно, что в диапазоне температуры до 900 К все критерии дают одинаковые результаты, при температуре выше 900 К критерий 2 сильно занижает время задержки воспламенения по сравнению с критериями 1 и 3. Расхождение между критериями 1 и 3 наблюдается начиная со значения температуры более 1400 К. Таким образом, наилучшее совпадение данных получено для критериев 1 и 3. В данной работе для определения времени задержки воспламенения частиц угля выберем один из них, а именно критерий 1.

Рассмотрим теперь влияние аккомодационных коэффициентов α_q и α_l на период задержки воспламенения микрочастиц угля ($d = 26$ мкм, $m_2 = 2.22 \cdot 10^{-4}$) в воздухе. Будем изменять эти параметры от значения 0 (соответствует тому, что все тепло гетерогенной реакции окисления кокса выделяется в частицу

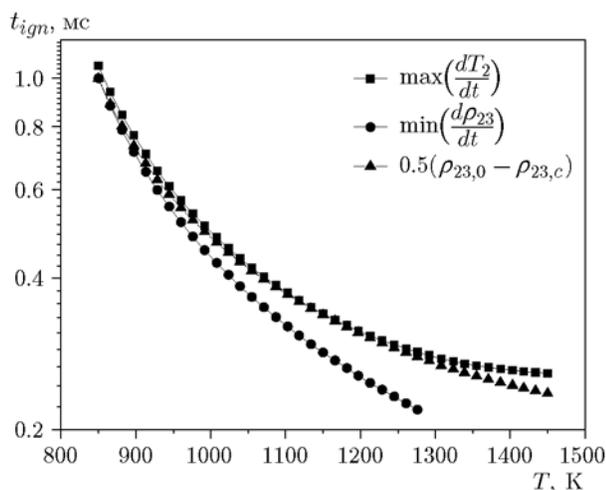


Рис. 1. Сравнение задержки времен воспламенения микрочастиц угля ($d = 26$ мкм, $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$), определенных по трем критериям воспламенения

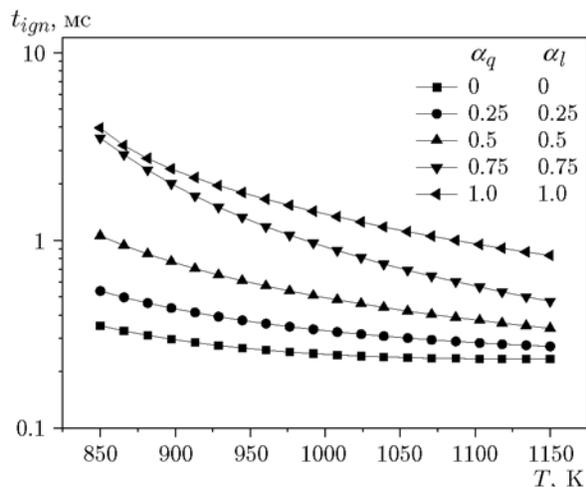


Рис. 2. Влияние аккомодационных коэффициентов тепловыделения за счет горения угля и теплопоглощения за счет реакции пиролиза на время задержки воспламенения частиц

и все тепло на реакцию пиролиза берется из частицы) до значения 1 (соответствует тому, что все тепло гетерогенной реакции окисления кокса выделяется в газ и все тепло на реакцию пиролиза берется из газа). На рис. 2 представлены зависимости времени задержки воспламенения частиц угля от температуры окружающего газа. Видно, что минимальное время задержки воспламенения наблюдается при $\alpha_q = 0$ и $\alpha_l = 0$, максимальное — при $\alpha_q = 1$ и $\alpha_l = 1$, т. е. чем больше тепла гетерогенной реакции окисления кокса поступает в частицу, тем быстрее она воспламеняется, причем независимо от того, сколько тепла отбирает у частицы реакция пиролиза. Далее во всех расчетах примем $\alpha_q = 0.5$ и $\alpha_l = 0.5$.

Выявим влияние давления окружающего частицы газа (воздуха) на время задержки воспламенения микрочастиц угля ($d = 26$ мкм, $m_2 = 2.22 \cdot 10^{-4}$). Соответствующие зависимости представлены на рис. 3. Отметим некоторые особенности. Во-первых, имеется две области влияния давления газовой смеси: в области 1 увеличение давления приводит к увеличению времени задержки воспламенения угольных частиц (при $T < 900$ К); в области 2 увеличение давления приводит к уменьшению времени задержки воспламенения угольных частиц (при $T > 900$ К). Возможно, это вызвано следующим обстоятельством. При низких температурах преобладает диффузионный механизм реакции над кинетическим; рост дав-

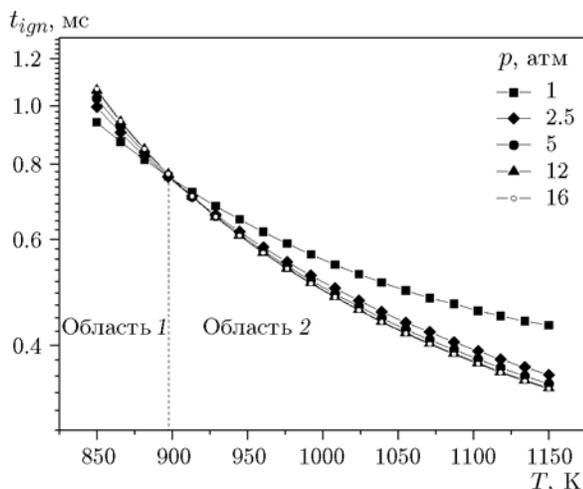


Рис. 3. Влияние давления газовой смеси на время задержки воспламенения микрочастиц угля ($d = 26$ мм, $m_2 = 2.22 \cdot 10^{-4}$)

ления приводит к тому, что увеличивается оборот энергии, необходимой для выхода летучих из частицы. Тем самым замедляется нагрев частиц и возрастает время их воспламенения. Во-вторых, увеличение давления газа выше 12 атм практически не приводит к изменению времени задержки воспламенения частиц угля.

Далее сопоставим наши расчетные данные с экспериментальными, полученными на установке быстрого сжатия [5]. Соответствующие зависимости времени задержки воспламенения угольных частиц в воздухе от температуры смеси в конце такта сжатия (давление в конце такта сжатия изменялось в диапазоне $1.5 \div 1.77$ МПа) приведены на рис. 4. Видно, что во всем рассматриваемом диапазоне давлений и температур смеси ($p \in (1.5, 1.77)$ МПа, $T \in (897, 1123)$ К) экспериментальные и расчетные значения времени задержки воспламенения угольных частиц удовлетворительно соответствуют друг другу. Кроме того, следует отметить наборы точек 1 и 2 на рис. 4. Параметры смеси в них таковы: 1 — $T = 897$ К, $p = 1.512$ атм, 2 — $T = 938$ К, $p = 1.635$ атм. При переходе от точек 1 к точкам 2 увеличиваются и давление, и температура газа, при этом как в расчетах, так и в экспериментах растет время задержки воспламенения. Повышение температуры газа дает уменьшение времени задержки воспламенения. Отсюда следует, что при таких температурах увеличение давления приводит к увеличению времени задержки воспламенения. То есть экспериментально так-

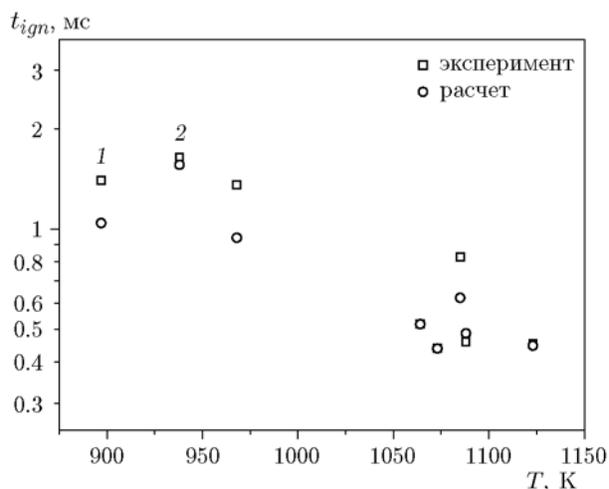


Рис. 4. Зависимость времени задержки воспламенения микрочастиц угля от температуры. Сравнение с данными эксперимента [5]

же наблюдается описанный выше эффект влияния давления газа: увеличение давления приводит к увеличению времени задержки воспламенения частиц угля (область 1).

Газовзвесь микрочастиц угля в метановоздушной смеси. Теперь рассмотрим процессы воспламенения микрочастиц угля в реагирующем газе — стехиометрической смеси метана и воздуха. На рис. 5 представлены зависимости времени задержки воспламенения микрочастиц угля диаметром 26 мкм с объемными концентрациями $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и стехиометрической метановоздушной смеси от температуры газовой смеси. Видно, что добавление микрочастиц угля в метановоздушную смесь ведет к уменьшению ее времени задержки воспламенения. Кроме того, предел воспламенения метановоздушной смеси при добавлении частиц угля смещается в сторону более низких температур, и чем больше объемная концентрация частиц, тем сильнее сдвигается этот предел: $T_* = 1103$ К в чистой метановоздушной смеси, $T_* = 1008$ К при $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$ и $T_* = 913$ К при $m_2 = 5 \cdot 10^{-4}$. В то же время увеличение объемной концентрации частиц практически не влияет на задержку воспламенения частиц (ср. $t_{ign}(C)$ при $m_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$). Также следует отметить, что при $T > 1350$ К все зависимости времени задержки воспламенения и угля, и метана стремятся к одной асимптоте. То есть при $T > 1350$ К характер изменения времени задержки воспламенения, а также его значения для метана и угля близки.

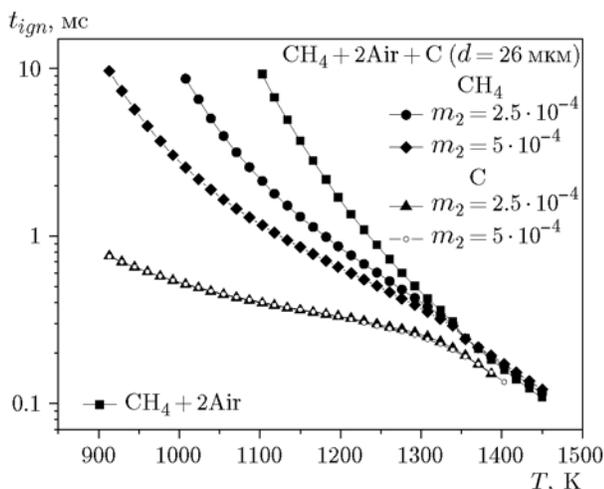


Рис. 5. Влияние объемной концентрации микрочастиц угля на время задержки воспламенения угля, метана и стехиометрической метановоздушной смеси

Далее проведем сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по задержке воспламенения смесей, полученными на установке быстрого сжатия [5]. На рис. 6 приведены экспериментальные [5] и расчетные зависимости времени задержки воспламенения угольных частиц и времени задержки воспламенения метана в смеси метан/воздух/частицы угля от давления смеси в конце такта сжатия (температура смеси в конце такта сжатия изменялась от 980 до 1060 К).

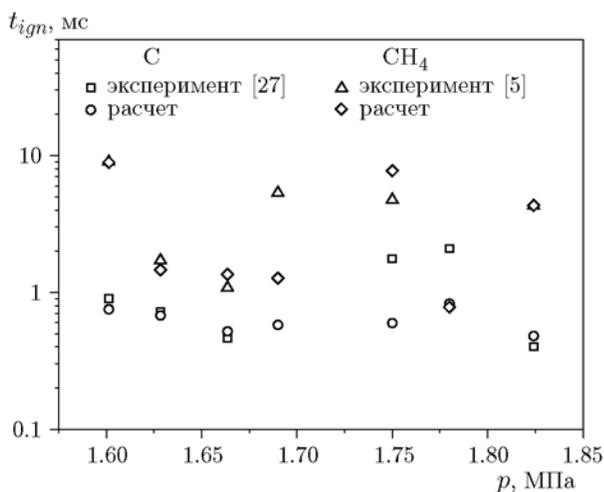


Рис. 6. Зависимости времени задержки воспламенения микрочастиц угля и метановоздушной смеси от давления. Сравнение с данными экспериментов [5]

Видно удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных времен задержки воспламенения во всем рассматриваемом диапазоне давлений и температур смеси ($p \in (1.6, 1.82)$ МПа, $T \in (989, 1052)$ К).

ВЫВОДЫ

Предложена физико-математическая модель воспламенения и горения метановоздушной смеси в присутствии микрочастиц угля, учитывающая детальную кинетику окисления газовой смеси метан/водород/воздух и процессы термической деструкции частиц угля с выходом летучих (метан и водород) в газовую фазу, воспламенение и горение летучих в газовой фазе и гетерогенную реакцию окисления углерода.

В расчетах с газозвесью микрочастиц угля в воздухе определено влияние давления газа на время задержки воспламенения микрочастиц угля. Показано, что существует две области влияния давления газовой смеси: область, в которой увеличение давления приводит к увеличению времени задержки воспламенения угольных частиц (при $T < 900$ К); область, в которой увеличение давления приводит к уменьшению времени задержки воспламенения угольных частиц (при $T > 900$ К). Кроме того, увеличение давления газа выше 12 атм практически не приводит к изменению времени задержки воспламенения микрочастиц угля.

Показано, что добавление микрочастиц угля в метановоздушную смесь ведет к уменьшению ее времени задержки воспламенения, смещению предела ее воспламенения в сторону более низких температур. Причем чем больше объемная концентрация частиц, тем сильнее сдвигается этот предел. В то же время увеличение объемной концентрации частиц практически не влияет на время задержки воспламенения самих частиц. Выявлено, что при температурах более 1350 К характер изменения времени задержки воспламенения, а также его значения для метана и угля являются близкими.

Проведено сопоставление расчетных данных по времени задержки воспламенения микрочастиц угля в смеси воздух — уголь и по времени задержки воспламенения метана и микрочастиц угля в смеси метан/воздух/уголь с экспериментальными данными, полученными на установке быстрого сжатия [5]. Показано удовлетворительное соответствие данных по вре-

менам задержки воспламенения как угля, так и метана во всех рассматриваемых смесях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабий В. И., Куваев Ю. Ф.** Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Rybak W., Zelkowski J., Remke S.** Experimental and theoretical studies of ignition behavior of coal char and coal particles suspensions // Preprints 51 of the Seventh Intem. Colloq. on Dust Explosions, Bergen, Norway, 23–26 June, 1996.
3. **Nettleton M. A., Stirling R.** The ignition of clouds of particles in shock-heated oxygen // Proc. Roy. Soc. — 1968. — V. A300. — P. 62–77.
4. **Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В.** О влиянии летучих на задержки воспламенения газовзвесей угольных пылей в ударных волнах // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 2. — С. 101–111.
5. **Лещевич В. В., Пенязьков О. Г., Шимченко С. Ю.** Воспламенение метановоздушной смеси в присутствии угольной пыли при температурах 800–1200 К // Горение и взрыв. — 2016. — Т. 9, № 3. — С. 29–35.
6. **Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачев А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис А. В.** Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 11–18.
7. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан — кислород и метан — водород — кислород // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 48–52.
8. **Essenhigh R. H., Misra M. K., Shaw D. W.** Ignition of coal particles: A review // Combust. Flame. — 1989. — V. 77. — P. 3–30.
9. **Wall T. F., Gururajan V. S.** Combustion kinetics and the heterogeneous ignition of pulverized coal // Combust. Flame. — 1986. — V. 66. — P. 151–157.
10. **Annamalai K.** Critical regimes of coal ignition // J. Eng. Power. — 1979. — V. 101. — P. 576–583.
11. **Libby P. A., Blake T. R.** Theoretical study of burning carbon particles // Combust. Flame. — 1979. — V. 36. — P. 139–169.
12. **Higuera F. J., Linan A.** Heterogeneous ignition of coal dust clouds // Combust. Flame. — 1989. — V. 75. — P. 325–342.
13. **Гостеев Ю. А., Федоров А. В.** Воспламенение газовзвеси частиц угля. Точечное приближение // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 36–45.
14. **Гостеев Ю. А., Федоров А. В.** Математическое моделирование подъема и воспламенения частиц угольных отложений // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 2. — С. 67–74.
15. **Мартенс Л. К.** Техническая энциклопедия. Т. 4. — М.: Книга по требованию, 2011.
16. **Федоров А. В., Фомин В. М., Гостеев Ю. А.** Динамика и воспламенение газовзвесей. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
17. **Кнунянц И. Л.** Краткая химическая энциклопедия. Т. 5. — М.: Книга по требованию, 2013.
18. **Kazakov Yu. V., Fedorov A. V., Fomin V. M.** Mathematical modeling of ignition in dusty gases // Arch. Combust. — 1987. — V. 7, N 1-2. — P. 7–17.
19. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Математическое моделирование детонационных процессов в газовзвеси частиц угля // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 103–112.
20. **NIST Chemistry WebBook**, <http://webbook.nist.gov/>.
21. **Вестбрук Ч., Уртьев П.** Применение химической кинетики для определения критических параметров газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 6. — С. 65–76.
22. **Тропин Д. А., Федоров А. В., Пенязьков О. Г., Лещевич В. В.** Время задержки воспламенения метановоздушной смеси в присутствии частиц железа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 11–20.
23. **Федоров А. В., Тропин Д. А.** Математическая модель воспламенения образцов магния в расширенном диапазоне параметров // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 64–71.
24. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Расчет пределов воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 46–51.
25. **Fedorov A. V., Fomin P. A., Fomin V. M., Tropin D. A., Chen J.-R.** Mathematical Analysis of Detonation Suppression by Inert Particles. — Kaohsiung, Taiwan: Kao Tech Publ., 2012.
26. **Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р.** Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011.

Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.