

УДК 534.222.2

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

*В. А. Левин, Ю. В. Туник
(Москва)*

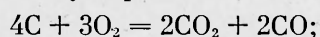
В частицах угля содержится углерод (кокс), а также адсорбированные в его порах летучие компоненты, состоящие в основном из метана, окиси углерода и водорода. Летучие сгорают в газовой фазе после их выхода из частиц (гомогенное горение), в то время как окисление углерода происходит на поверхности частиц (гетерогенное горение). Как и в случае однофазной газовой среды, различают два режима горения угольной пыли: медленное и быстрое (детонационное) горение.

В экспериментах [1—3] по инициированию гетерогенной детонации угольной пыли в воздухе с добавлением метана при некоторых условиях формировалась детонация, распространяющаяся по газу. Горение частиц происходило далеко за фронтом газовой детонации и не приводило к ее усилению. При отсутствии горючего газа также не удалось получить гетерогенной детонации [4]. В то же время в [4] отмечается склонность угольной пыли к детонационному горению за взрывной ударной волной (УВ) в чистом кислороде. Формирование детонации авторы объясняют наличием вторичных УВ, а также дополнительным прогревом газозвеси радиационными потоками тепла из зоны горения.

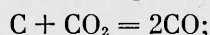
В настоящей работе горение угольной пыли за головной УВ в смеси кислорода с ацетиленом и в воздухе с различным содержанием метана исследуется численно на основе предложенной в [5] математической модели. Учитывается влияние излучения на формирование в газозвеси гетерогенной детонации.

Модель процессов горения угольной пыли. По горению угольных частиц накоплен богатый экспериментальный материал. Основные процессы, связанные с этим горением, состоят в следующем:

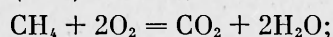
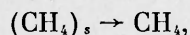
- 1) гетерогенное горение углерода



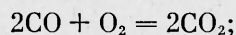
- 2) гетерогенные эндотермические реакции восстановления



- 3) газификация летучих (в основном это метан) и их сгорание в газовой фазе



- 4) догорание окиси углерода



- 5) сублимация углерода [6].

Иницированное каким-либо способом горение угольной пыли генерирует возмущения, способные поддерживать движение двухфазной смеси. В отличие от известного механизма распространения горения, обу-

словленного теплопроводностью газа, в случае двухфазной среды существенным становится конвективный механизм передачи тепла, связанный с относительным движением фаз и тепло- и массообменом между ними.

Основой для теоретического рассмотрения развития горения и связанного с ним движения угольной газовой взвеси послужила двухскоростная модель двухфазной среды [7, 8]. При этом считается, что для описания внутренней энергии частиц достаточно ввести температуру твердой фазы T_s , постоянную по всему объему частицы, отличную от температуры окружающего газа.

Приближение лучистой теплопроводности для двухтемпературной среды. В работах [9—11] обсуждалось влияние излучения на скорость горения угольных частиц и их воспламенение. Учитывался лучистый теплообмен между частицами и облучателем, роль которого в газовых взвешах играет газ, окружающий частицу, или стенки каналов. Поток тепла при этом определялся выражением

$$q_R = \operatorname{div} \bar{S} = \varepsilon \alpha_R \varphi (T^4 - T_{\text{обл}}^4),$$

где ε — коэффициент излучения абсолютно черного тела; α_R и φ — степень черноты и коэффициент облученности частицы. В задачах, где рассматривается распространение фронта горения, необходимо учитывать прогрев частиц и газа радиационными потоками тепла, идущими из отдаленных областей с высокими температурами частиц и газа.

В [12] с этой целью использовано диффузионное приближение для расчета потоков излучения при горении углерода в кислороде. Газовая фаза считается абсолютно прозрачной и неизлучающей средой. Радиационный поток S_C к частицам определяется из соотношений

$$\frac{d}{dx} S_C = \kappa c [V_p(T_s) - V], \quad \frac{dV}{dx} = -\frac{3\kappa}{c} S_C.$$

Здесь V — плотность энергии излучения; $V_p(T) = 4\sigma/c \cdot T^4$ — равновесная плотность энергии при температуре T ; σ — постоянная Стефана — Больцмана; c — скорость света; κ — коэффициент поглощения частиц.

В настоящей работе делается попытка учесть влияние излучения не только твердой, но и газовой фазы на распространение горения угольной пыли за ударными и детонационными волнами.

В [13] исследована зависимость поглощательной способности угля α_R от частоты. В широком диапазоне частот α_R меняется от 0,95 до 0,9. Поэтому уголь можно считать абсолютно черным веществом. Тогда для частиц, имеющих форму шара с диаметром d и известной плотностью распыления n , коэффициент поглощения $\kappa_v = \kappa = n\pi d^2/4$ [14].

Газ, окружающий частицы, состоит из кислорода и продуктов горения. Считается, что он также представляет собой серую среду, характеризующую коэффициентом поглощения воздуха k_0 на частоте ν_0 , соответствующей максимуму спектральной плотности равновесного излучения с температурой газа T [15]. В расчетах используется формула, аппроксимирующая зависимость k_0 от давления и температуры газа при $T \geq 4000$ К:

$$k_0 = p^{1,41} \cdot 10^{(T \cdot 10^{-3} - 4)^{1/2} - 4,3}.$$

При $T < 4000$ К полагается $k_0 = 0$.

Оценка значений κ и k_0 показывает, что в условиях рассматриваемых ниже задач $\kappa \geq k_0$ и $\kappa^{-1} \ll l_0$, где l_0 — характерный масштаб длины. Второе неравенство позволяет использовать приближение лучистой теплопроводности [16] для определения радиационных потоков энергии.

Выражение для равновесной плотности излучения двухфазной среды с учетом указанных выше допущений получается из стационарного решения уравнения переноса: $V_{pv} = \frac{\kappa_v V_{pv}(T_s) + k_v V_{pv}(T)}{\kappa_v + k_v} = V_{pv}(T, T_s)$.

Учитывая основное предположение приближения лучистой теплопровод-

ности (спектральная плотность излучения имеет равновесное значение), для потока излучения получаем выражение
$$\bar{S}_v = - \frac{c \nabla V_{pv}(T, T_s)}{3(\kappa_v + k_v)}$$

В приближении серого вещества при $\kappa_v = \kappa$ и $k_v = k_0$ полный поток энергии

$$\bar{S} = - \frac{c \nabla V_p(T, T_s)}{3(\kappa + k_0)} = - \frac{c}{3} \frac{1}{(\kappa + k_0)} \nabla \frac{\kappa V_p(T_s) + k_0 V_p(T)}{(\kappa + k_0)}$$

а поток, связанный с частицами:

$$\bar{S}_c = \frac{\kappa}{(\kappa + k_0)} \bar{S}$$

Постановка задачи. Газовзвесь угольной пыли, близкая по составу к стехиометрической, характеризуется небольшим массовым содержанием частиц (50%). Их объемной концентрацией, следовательно, можно пренебречь. В связи с этим силовое и тепловое взаимодействие между фазами представляет собой сумму сил сопротивления и потоков тепла между газом и отдельной частицей. Используются одномерные уравнения движения угольной газовзвеси с учетом предложенных упрощений в описании химических реакций и процессов тепло- и массообмена, силового взаимодействия между фазами и радиационного переноса энергии [5].

Развитие горения угольной пыли за головной детонационной или ударной волной, распространяющейся по газу в канале постоянного сечения, рассматривается на основе сформулированной модели. Состав ($n_0, \beta_{i0} = \rho_{i0}/\rho_0, \rho_{c0}/\rho_0, \rho_{v0}/\rho_0$) и параметры газовзвеси перед головной волной считаются постоянными, $T_s = T = T_0, p = p_0$. Здесь n — число частиц в единице объема; ρ_i — плотность i -го газового компонента ($O_2, CO_2, CO, H_2O, CH_4, N_2$); ρ_c — плотность коксовой основы угольных частиц; ρ_v — плотность летучих в твердой фазе. В начальный момент времени задается положение инициирующей детонационной волны, L_* — расстояние от торцевой стенки канала. Волна считается бесконечно тонкой волной Чепмена — Жуге в ацетилене с кислородом. Распределение параметров газа ρ_*, v_*, p_* за ней задается известными соотношениями.

Предполагается, что за время инициирования детонации Чепмена — Жуге в газе положение и температура угольных частиц не изменяются: $\rho_{c*} = \rho_{c0}, \rho_{v*} = \rho_{v0}, v_* = 0, T_{s*} = T_0$. Расчеты проводились по явной схеме С. К. Годунова. Радиационный прогрев газа перед головной УВ не учитывался.

Горение угольной пыли за головной УВ в метановоздушной газовой смеси. Один из ведущих процессов горения за головной УВ в рассматриваемой смеси — горение метана. Скорость изменения концентрации метана определяется с использованием известного значения времени индукции τ , зависящего от давления, температуры и состава смеси [17]:
$$\omega = \beta_{CH_4}^\alpha c_p T_i^2 / Q E \tau, \tau^{-1} = 2,5 [10^{10} \exp(-25000/T) + 10^4 \exp(-10000/T)] \times \beta_{CH_4}^{-0,3} \beta_{O_2} (p/p_0)^{0,7}$$

Выражение для ω получено в соответствии с экспоненциальной теорией развития горения. При этом показатель степени α — величина неопределенная; Q — тепловыделение при $T_i = 1500$ К.

Результаты расчета для угольной пыли с 30%-ным содержанием летучих и 6%-ным содержанием метана в воздухе при $L_* = 30$ м показаны на рис. 1, а и 2. По значениям параметров за головной УВ (см. рис. 2) в случае $\alpha = 0$ видно, что коксовая основа угольных частиц не горит из-за отсутствия кислорода. Его выгорание происходит в узкой зоне за фронтом волны. Этому способствуют выход и горение летучих (кривые ρ_v и β_{CH_4} — летучие в твердой фазе и массовая концентрация метана). Быстрое горение метана обеспечивают формирование плоскости Чепмена — Жуге и стационарное распространение детонации по газовой фазе (см. рис. 1, а, $\alpha = 0$).

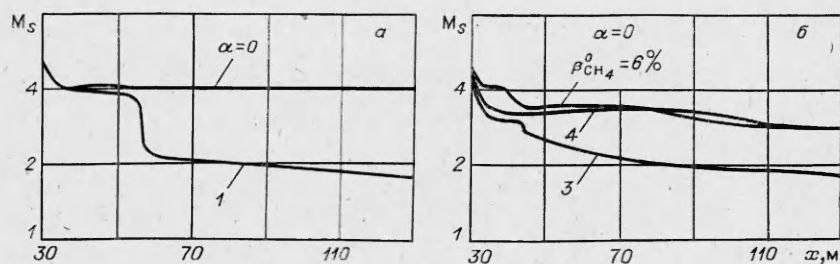


Рис. 1.

В случае $\alpha = 1$ скорость горения метана и, следовательно, интенсивность тепловыделения уменьшаются. Число Маха относительной скорости газа за головной волной $M < 1$. Детонационное горение не формируется (см. рис. 1, $\alpha = 1$). В экспериментах [2] наблюдалась детонация, параметры которой соответствуют рассчитанным. Таким образом, в рассматриваемой газовой смеси инициирование гетерогенной детонации невозможно из-за недостаточного количества кислорода. В дальнейших расчетах использовалось значение $\alpha = 0$ в выражении для скорости химической реакции.

В связи с этим интересно рассмотреть возможность инициирования гетерогенной детонации в воздухе при меньшем содержании метана, в частности летучих компонентов. На рис. 1, б и 3 представлены результаты расчетов для антрацита (содержание летучих 5%). Метан сгорает в узкой зоне за УВ, но относительная скорость газа не достигает местной скорости звука (см. рис. 3); стационарное детонационное горение газа не наблюдается. Небольшое количество метана (4–6%) обуславливает воспламенение коксовой основы угольных частиц. За зоной горения частиц формируется плоскость Чепмена — Жуге ($M = 1$) по скорости газовой фазы. Потери энергии, связанные с межфазным взаимодействием в зоне горения газовой смеси, не компенсируются выделяемой энергией, что приводит к квазистационарному режиму распространения гетерогенной детонации, характеризующемуся постепенным замедлением и ослаблением головной волны. В случае $\beta_{C_2H_4}^0 = 3\%$ отрыв горения от головной волны происходит на более ранней стадии течения. Резкое замедление УВ, уменьшение температуры газа за ней приводят к полному затуханию (см. рис. 1, б). Таким образом, трудности инициирования гетерогенной детонации угольной пыли в воздухе связаны в основном с малым содержанием кислорода.

Горение угольной пыли за газовой ДВ в кислороде. Приводятся результаты расчета горения антрацита ($\rho_{v_0}/\rho_{s_0} = 0,05$; $\rho_{s_0}/\rho_0 = 0,14$) за ДВ в смеси ацетилена (10%) и кислорода. Начальный диаметр частиц $d = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $L_* = 0,05$ м. Волна Чепмена — Жуге в газе считается бесконечно тонкой.

На рис. 4 в плоскости x, t приводятся изменение M и траектория головной волны D , а также траектория переднего фронта гетерогенного горения D_f . Газ за головной ДВ характеризуется $T \sim 2000$ К. В результате интенсивного теплообмена между фазами происходит прогрев частиц и воспламенение кокса. Его интенсивное горение обусловлено достаточным содержанием кислорода в газовой фазе.

Возмущения, идущие из зоны горения, формируют УВ, догоняющую фронт газовой детонации. Максимальные различия в значениях газодинамических параметров с учетом (индекс I) и без учета излучения составляют несколько процентов, что соответствует соотношению между радиационными и конвективными потоками тепла. Малое влияние потоков лучистой энергии обусловлено невысокой температурой частиц при концентрации, близкой к стехиометрической. Если пренебречь излуче-

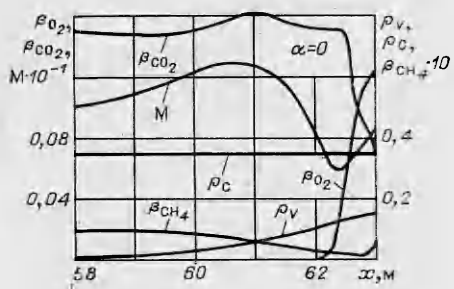


Рис. 2.

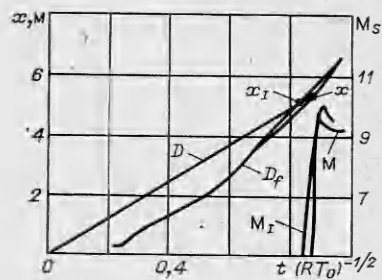


Рис. 4.

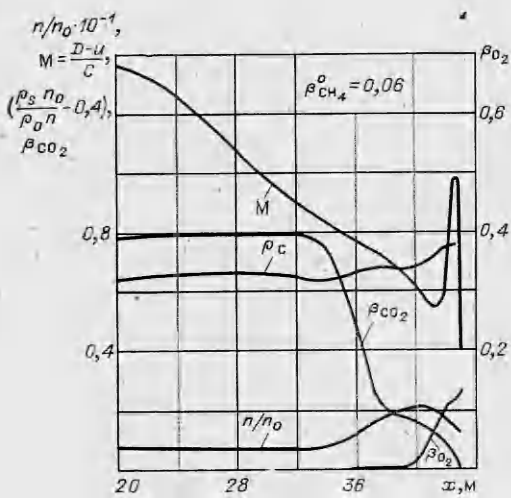


Рис. 3.

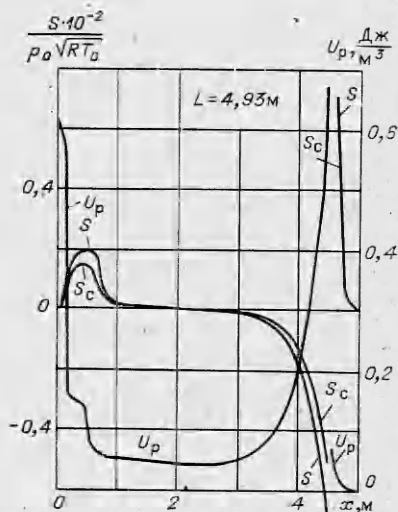


Рис. 5.

нием газа, поток энергии вычисляется по формуле

$$\bar{S}_G = \frac{16}{3} \frac{\sigma}{\kappa} T_s^3 \frac{dT_s}{dx}.$$

Градиент температуры можно оценить по соотношению

$$dT_s/dx \sim \Delta T_s/\Delta x \sim \Delta T/v \cdot \tau_p,$$

где τ_p — характерное время гетерогенного горения частиц, за которое быстро повышается температура до $T_s = 3500$ К. В рассматриваемых условиях радиационные потоки соизмеримы с конвективными, если $\rho_s/\rho_0 \approx \sim 10^{-4}$, т. е. много меньше стехиометрической.

По оценкам, коэффициент поглощения в газе существенно меньше коэффициента поглощения частиц. Однако непосредственно за волной излучение газа составляет значительную часть (до 25%) лучистых потоков энергии (рис. 5), что связано с высокими температурами и давлениями в газе.

В результате взаимодействия сформировавшейся в потоке УВ с головной детонацией происходит переход газовой детонации в гетерогенную. На рис. 4 видно, что при излучении этот переход осуществляется несколько раньше, чем без учета излучения.

Таким образом, при выходе кислородно-ацетиленовой детонации в метановоздушную газовзвесь угольной пыли (близкой по составу к стехиометрической) с размером частиц 80 мкм в зависимости от содержания летучих компонентов и метана реализуются различные режимы горения смеси: детонация в газовой фазе — частицы не участвуют в горении; квазистационарная гетерогенная детонация — за зоной гетерогенного го-

рения частиц формируется плоскость Чепмена — Жуге по газовой скорости, но выделение энергии не компенсирует потерь, связанных с межфазным взаимодействием, что приводит к постепенному замедлению и ослаблению головной волны. При малой концентрации метана в воздухе (~3%) детонационное горение не реализуется. Излучение не оказывает влияния на развитие детонации из-за сравнительно низких температур газа и частиц.

В газозвеси угольной пыли с кислородом и ацетиленом излучение способствует ускорению перехода газовой детонации в гетерогенную, но его роль невелика: в частности, расстояние, на котором формируется гетерогенная детонация, уменьшается на 3% при массовой концентрации угольной пыли 0,14 кг/м³. Влияние излучения ослабляется процессом сублимации углерода, ограничивающим рост температуры частиц. В основном переход обусловлен прогревом частиц за головной детонационной волной и интенсивным горением кокса в условиях достаточного количества кислорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. K. Riemand, I. Lieberman. 15-th Intern. Symp. on Combustion. Tokyo, 1974.
2. А. Г. Абинов, А. М. Чеховских.— В кн.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черноголовка, 1978.
3. A. Arbor, C. W. Kauffman, J. A. Nicholls e. a. Biuletyn informacji technicznej komendy glownej strazy pozarnych, 1980, 3—4, 12.
4. M. A. Nettleton, R. Stirling. Comb. Flame, 1973, 21, 3.
5. В. А. Левин, Ю. В. Туник. Докл. АН СССР, 1984, 276, 4, 834.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. Т. 2, кн. 1. М.: Наука, 1979.
7. X. A. Рахматулин. ПММ, 1955, 20, 2.
8. Р. И. Нигматулин. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
9. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.
10. Т. В. Виленский, Д. М. Хзмалян. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1978.
11. Аннмалли. Тр. Амер. общ-ва инж.-механиков. Энергетические машины и установки, 1979.
12. П. Б. Вайнштейн. ПМТФ, 1973, 3.
13. Гроссхандлер, Монтейро. Тр. Амер. общ-ва инж.-механиков. Теплопередача, 1982, 104, 4.
14. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
15. Оптические свойства горячего воздуха/Под ред. А. М. Бибермана. М.: Наука, 1970.
16. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
17. А. А. Борисов, Е. В. Драгалов, В. М. Заманский и др. Хим. физика, 1982, 4.

Поступила в редакцию 23/V 1986

УДК 534.222.2

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ЗА УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Е. А. Афанасьева, В. А. Левин

(Москва)

Большое внимание в последнее время уделяется решению задач горения различных многофазных сред, когда частицы жидкого или твердого топлива сгорают в атмосфере газообразного окислителя. Особый интерес среди них представляют проблемы, связанные с горением и воспламенением частиц металлов, в частности алюминия.

Горение газозвесей металлических частиц имеет ряд особенностей, затрудняющих комплексное рассмотрение всего процесса. Наиболее существен процесс образования конденсированной окиси на поверхности частицы и в газовой фазе. Для Al, в отличие от других металлов, частицы конденсированной окиси в газовой фазе образуются непосредственно