

тельность их влияния на скорость реакции не превышает 10^{-4} с, иначе это наблюдалось бы по аномальному ходу температуры. Однако прямой ответ о скорости реакции в УВ могут дать эксперименты по определению температуры непосредственно в УВ. Термопарная методика — одна из наиболее надежных для этой цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Бацанов. Изв. СО АН СССР, 1967, 14, 32.
2. А. Н. Дремин, О. Н. Бреусов. Усп. химии, 1968, 37, 898.
3. С. С. Бацанов, Г. С. Доронин и др. ФГВ, 1968, 4, 2, 108.
4. Ch. Klee, M. Krok, D. Ludwig.— In: Shock Waves in Condensed Matter.— 1981. N. Y., 1982.
5. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
6. Свойства неорганических соединений. Справочник/Под ред. А. И. Ефимова и др. Л.: Химия, 1983.

Поступила в редакцию 10/1 1986,
после доработки — 8/VII 1986

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ВЗВЕСЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В СМЕСЯХ КИСЛОРОДА С АЗОТОМ В УДАРНОЙ ТРУБЕ¹

Д. Эдвардс, Р. Фёрнлей, М. Негглтон

На обычных электростанциях распыленный уголь транспортируется к топкам паровых котлов с помощью воздуха, поэтому большое практическое значение имеет вопрос о детонационной способности взвесей угольных пылей в окислительной атмосфере при размерах частиц $1 \leq d_p \leq 100$ мкм. Очевидную необходимость представляет определение пределов детонации таких взвесей по составу. Проведен ряд экспериментальных исследований [1—4], направленных на решение этих вопросов, начали появляться и теоретические модели [5]. Однако в экспериментах возникают трудности интерпретации результатов в связи с выбором источников инициирования, а также из-за отсутствия уверенности, что ударная труба имеет достаточную длину, чтобы имел место режим стационарной детонации, не подверженный влиянию источника инициирования. Последняя проблема осложняется также неопределенностями, остающимися в основе расчета скорости Чепмена — Жуге для смеси. Например, можно ли определять ее исключительно по энергии, высвобождающейся при горении летучих компонентов, выделяющихся на единицу массы взвеси, и что увеличивает содержание летучих при учете очень высоких скоростей подъема температуры [6] в потоке позади предвестника? Или же необходимо рассчитывать скорости Чепмена — Жуге по полному сгоранию фракции частиц минимального размера.

Иницирование детонации в пылевом облаке более сложный процесс, чем в газовой смеси. Более того, присутствие второй фазы препятствует использованию большинства экспериментальных методов наблюдения развития поперечных волн на первичном скачке, бесспорно наиболее доступных с точки зрения идентификации стационарного режима детонации. Сложности увеличиваются в связи с присутствием частиц разной формы и размера, что проявляется в различных коэффициентах сопротивления и, следовательно, во времени, необходимом для разгона их до скорости ударно-сжатого газа, и приводит к изменению скорости роста температуры. Не установлено также, поступает ли выделившаяся энергия к частицам в потоке сжатого газа посредством реакций на их поверхности или из газового пламени вблизи поверхности [7].

¹ Перевод Т. Савельевой под ред. М. Е. Топчяна.

Наиболее современные работы [8] предполагают, что процессы, включающие освобождение летучих, слишком медленны, чтобы поддерживать волну Чепмена — Жуге, их скорости на ранних стадиях ускорения иницирующего пламени очень неопределенны.

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние размера частиц (практически монодисперсных), содержания летучих и состава газовой кислородно-азотной смеси на ускорение иницирующего пламени во взвесах угольной пыли.

ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки с вертикальной трубой 4 диаметром 50 мм и длиной прямой измерительной секции 2620 мм. Пламя порождается взрывной волной, возбуждаемой детонацией, распространяющейся по ацетилено-кислородной смеси, отделенной от пылевой взвеси диафрагмой из пластика 6. Ускорение пламени в угольной пыли прослеживалось посредством комбинации микроволновой интерферометрии с измерениями давлений. Хотя ударная труба была слишком короткой, чтобы с уверенностью фиксировать существование стационарной детонации во всех случаях, неизменно имело место нерегулярное ускорение пламени к концу трубы, приводившее к скорости вплоть до 1,8 км/с.

Иницирующая секция 8 смонтирована горизонтально и снабжена спиралью Щелкина 9, что способствовало быстрому формированию волны Чепмена — Жуге в стехиометрической смеси ацетилена с кислородом при давлении 26 кПа. Секция иницирования соединялась с измерительной круглым коленом 7 длиной в четверть окружности радиуса 150 мм, через устройство для закрепления диафрагмы 6 Melinex. Датчики давления, расположенные в главной трубе на расстоянии 2293 мм друг от друга (см. рис. 1, 3, 5), показали, что когда в трубе нет пылевого облака, давление очень близко к величине, определяемой состоянием в волне Чепмена — Жуге в смеси $2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2$, что свидетельствует о прохождении детонации по изгибу без заметных возмущений [9].

Питатель угольной пыли 1 спроектирован так, чтобы имелась возможность вакуумировать его до давления 10 кПа — начального давления в измерительной секции. Поток угольной пыли регулировался изменением размера отверстия в основании питателя, а равномерность его обеспечивалась непрерывным встряхиванием питателя. Достаточная однородность потока частиц по сечению трубы достигалась путем пропуска его через обратный конус. Для частиц меньшего размера ($d_p = 25$ мкм) концентрация частиц вблизи стенок была вдвое выше, чем в центре трубы. Для больших частиц ($45 \leq d_p \leq 65$ мкм) отношение концентраций возрастало примерно до трех.

В экспериментах использовались два вида угля. Один из них «Британия» (NCB ranking 203) с содержанием летучих 16%. Образец приготовлен несколько лет назад BCURA [10] и сохранялся в герметизированных контейнерах. Второй — Гриметорп Экспорт Даублз, который часто используется как стандарт (NCB ranking 402 с приблизительным содержанием летучих 32%).

Размеры частиц часто оценивают в предположении, что они сферические. На рис. 2 приведена типичная фотография образца угля типа «Британия», она показывает, что хотя характерный размер действительно существует, частицы, конечно, далеки по форме от сферической. Тем не менее, в соответствии со сложившейся практикой, этот образец рассматривался, как имеющий размер 25 мкм в диаметре. Второй вид угля просеивался перед использованием сквозь сито с выделением фракции $d_p = 45 \div 65$ мкм.

Регистрирующая система установки состояла из датчиков давления типа Kistler 601A, расположенных на расстояниях 65 мм и 2,29 м от диафрагмы, разделяющей секции рабочую и иницирования. Сигнал от

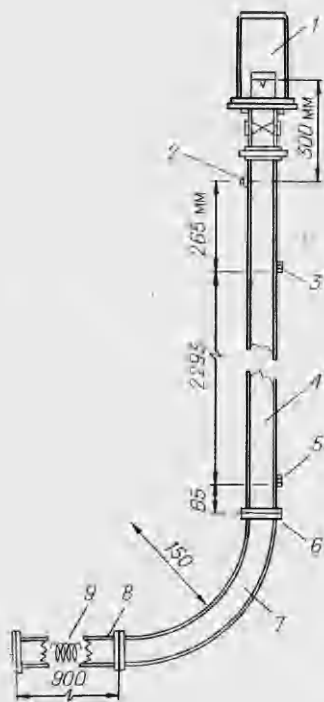


Рис. 1. Схема установки для исследования детонации угольной пыли.

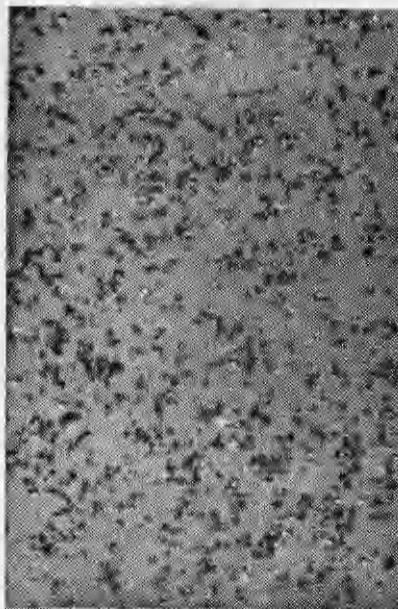


Рис. 2. Фотография частиц угля типа «Британния».

первого использовался для запуска записывающего оборудования, сигнал от второго запоминался в записывающем устройстве Datalab-905. Микроволновое излучение частотой 9,4 ГГц (длина волны 34,4 мм) питало антенну, находящуюся на расстоянии 2,55 м от диафрагмы (см. рис. 1, 2). Излучение, отраженное от ионизованной области, смешивалось с частью излучаемого сигнала и также подавалось на устройство Datalab-905. Подробности использования микроволновой интерферометрии для определения скорости детонационных фронтов в газообразных смесях см. в [11, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Микроволновые интерферограммы записи давления. На рис. 3 сопоставлены типичная интерферограмма от ускоряющегося пламени во взвеси угольной пыли в кислороде (а) и полученная в отсутствие пыли в измерительной секции (б). Напомним, что частота сигнала связана со скоростью движения фронта, а его амплитуда — со степенью ионизации. Точка А соответствует детонации в ацетиленокислородной смеси, отражающейся от диафрагмы и разрушающей ее с последующим образованием взрывной волны в исследуемой смеси. Как в случае отсутствия, так и при наличии угольной пыли существует участок В, на котором скорость фронта медленно падает. В присутствии пыли наблюдается медленный рост скорости на участке CD, где взвесь воспламеняется. Этот отрезок сопровождается быстрым ускорением на участке DE, здесь степень ионизации также возрастает. Эти два характерных признака отсутствуют на интерферограммах, полученных без угольной пыли.

На рис. 4 показана подборка типичных профилей давления, полученных вблизи конца измерительной секции, иллюстрирующих влияние увеличения содержания кислорода r в газовой смеси при отношении масс угля и кислорода $\lambda^* \sim 0,6$ для частиц угля с $d_p = 55$ мкм. Увеличение r от 21 до 52,6% проявляется в сокращении времени прохождения между датчиками, размещенными в точках 3 и 5 на трубе (см. рис. 1, $l = 2,293$ м) и очень резком ускорении волны, когда она подходит к за-

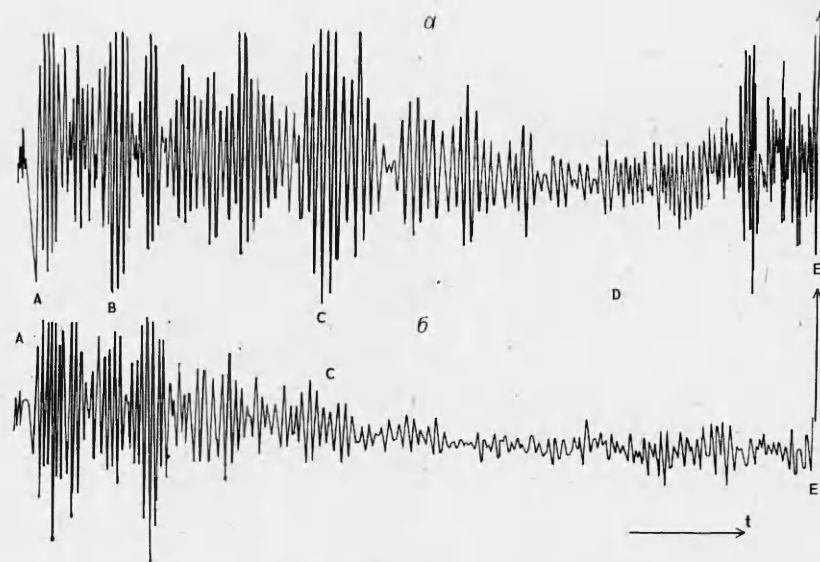


Рис. 3. Записи микроволновой интерферометрии.

крытому концу трубы, отражается и возвращается к датчику 3 (см. рис. 1). Таким образом, при $r < 53\%$ процесс ускорения пламени ограничивается длиной измерительной секции и имеет место монотонное нарастание амплитуды начального скачка от уровня, близкого наблюдаемому в отсутствие угольной пыли (при $r = 21\%$), до величины, примерно в 3 раза большей при более высоких содержаниях кислорода. Дальнейший рост r (осциллограммы 1 и 2) проявляется в увеличении ускорения между датчиком давления 3 и концом измерительной секции. Однако необходимо заметить, что время прохождения базового расстояния между датчиками возрастает при $r > 68\%$, и что пик давления при $r = 100\%$ меньше, чем при $r = 84\%$.

Еще одна заметная особенность состоит в увеличении крутизны ведущего фронта с ростом содержания кислорода. Фронты со скачками возникают при $r > 52\%$. Присутствие фронта пламени проявляет себя более пологим нарастанием давления в течение 50—100 мкс после прохождения ведущей волны. Для $r \approx 50\%$ подъем давления, связанный с пламенем, отстает на 100—200 мкс от ведущей волны.

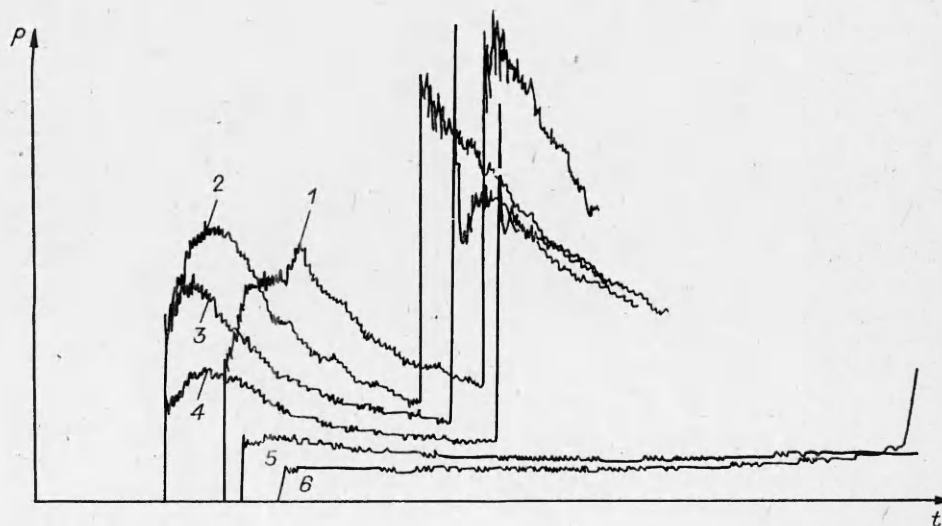
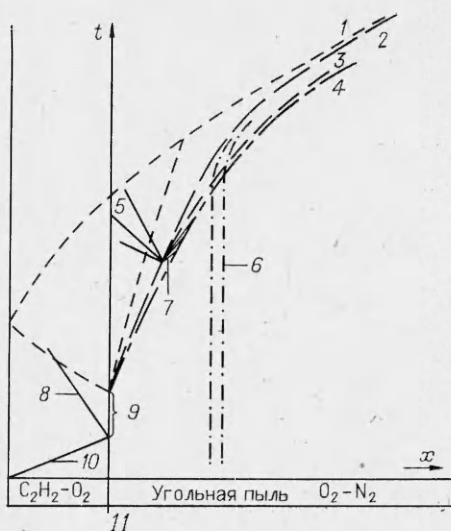


Рис. 4. Осциллограммы давления для различных смесей кислорода с азотом. Датчик 2. Содержание кислорода r , %: 1 — 100; 2 — 84,2; 3 — 68,4; 4 — 52,6; 5 — 32,9; 6 — 21.

Рис. 5. Идеализованная x, t -диаграмма воспламенения в ударно-сжатой суспензии угольной пыли в смеси $O_2 - N_2$.

1 — голова волны разрежения; 2 — контактная поверхность; 3 — пламя; 4 — ведущая УВ; 5 — веер волн разрежения; 6 — траектория угольных частиц; 7 — зона воспламенения; 8 — отраженная волна; 9 — задержка разрушения диафрагмы; 10 — инициирующая волна; 11 — диафрагма.



Скорости пламени. Чтобы облегчить интерпретацию интерферограмм, на рис. 5 приведена идеализованная x, t -диаграмма процесса. Иницирующая детонация в смеси $2C_2H_2 + 5O_2$ идет слева направо с постоянной скоростью, отражается от диафрагмы, которая после небольшой задержки разрушается. Возникающий поток возбуждает ударную волну (УВ), распространяющуюся во взвесь угольной пыли, и веер волн разрежения, движущийся в продукты детонации ацетиленокислородной смеси и отражающийся от торца инициирующей секции. На этой стадии микроволновое излучение отражается от сильно ионизованных продуктов детонации. Когда пылевое облако воспламеняется, возрастает ионизация в горючей пыли, возможно, усиливается выделением минеральных веществ, таких, как хлористый натрий (в охлаждающихся продуктах детонации она уменьшается). Микроволновое излучение начинает отражаться от зоны горения зарождающейся двухфазной детонации. В силу того, что время разогрева больших частиц достаточно велико, а также из-за их медленного по сравнению с частицами газа ускорения, воспламенение происходит далеко за первичным скачком, возможно, в расширяющихся продуктах газовой детонации.

Рис. 6 показывает типичные эволюции скорости от расстояния, полученные из микроволновых интерферограмм, таких как на рис. 2. Главные особенности профилей скоростей согласуются с идеализованной моделью. В зависимости от поведения разделяющей диафрагмы, фронт ионизации проходит в пылевое облако при начальной скорости

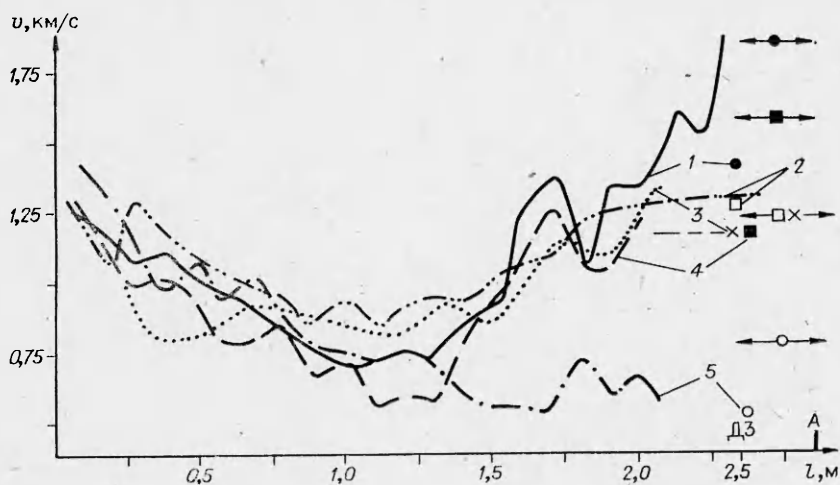


Рис. 6. Эволюция скорости фронта ионизации в зависимости от расстояния до диафрагмы.

$d_p = 54$ мкм: 2 — $\lambda^* = 0,28$ (100% кислорода), 3 — $\lambda^* = 0,62$, 5 — $\lambda^* = 2,94$ (21% кислорода); $d_p = 25$ мкм: 1 — $\lambda^* = 0,76$, 4 — $\lambda^* = 1,20$. Точки — скорости ударных волн в точке расположения датчика давления 3 (ДЗ) и между ним и микроволновой антенной, расположенной в точке А.

$2,0 \geq v_i \geq 1,5$ км/с, замедляется, проходя первые 0,5 м до $1,0 \geq v \geq 0,8$ км/с.

В присутствии пыли скорость остается постоянной на этом уровне до начала ускорения. В отсутствии угольной пыли она продолжает падать, выходя на плато (≈ 500 м/с). Когда воспламенение происходит вблизи контактной поверхности, разделяющей продукты газовой детонации и пылевое облако, разрыв профиля скорости возникать не должен, он и не наблюдается.

Поскольку микроволновый сигнал обрывается, когда ведущий фронт достигает антенны, скорости УВ и пламени не могут сопоставляться здесь и далее вниз по потоку. В целом прямое сравнение в непосредственной близости от этой области вверх по потоку показывает, что скорость пламени несколько выше скорости ведущего скачка, как можно было бы ожидать в случае пламени, действующего как поршень, возбуждающий волну в среде перед ним [13].

Ни первоначальное торможение, ни последующее ускорение не происходят монотонно. Однако в целом колебания имеют большую амплитуду в фазе ускорения. Можно предположить, что это результат изменений концентрации угольной пыли вдоль оси трубы, сравнимых с той, которая наблюдается в поперечном сечении. Необходимо особо отметить осцилляции скорости, означающие воспламенение во взвеси угольной пыли в воздухе на расстоянии $\sim 1,7$ м от диафрагмы. Подтверждение воспламенения и последующего ускорения пламени в воздухе следует из возрастания скорости ведущей волны между точкой 2 и микроволновой антенной (см. рис. 6).

Здесь возможно только ограниченное сравнение влияния содержания летучих веществ и размера частиц на переход к детонации. Результаты экспериментов по переходу горения в детонацию для частиц меньшего размера показывают, что ускорение фронта, когда он приближается к концу трубы, выше. Таким образом, оказывается, что размер частиц более важен, чем содержание летучих. Заметим, что их содержание в крупных частицах приблизительно вдвое выше, чем в меньших. Однако большая скорость разогрева меньших частиц в условиях описанного эксперимента могла проявиться в значительном снижении эффективных отношений выделения летучих веществ.

Влияние состава на скорости ударных волн. По измерениям давления датчиком 3 с использованием стандартных соотношений между величиной скачка и числом Маха рассчитаны скорости ударных волн. Учитывая конечное время, необходимое для ускорения частиц и передачи им энергии, можно рассматривать взвесь как идеальный газ [4] и использовать в формулах соответствующие величины для отношения теплоемкостей и скорости звука. Была также возможность вычислить среднюю скорость ведущей волны по времени прохождения ею расстояния между датчиком 3 и микроволновой антенной.

Влияние состава взвеси на скорость скачка в конце трубы показано на рис. 7 и 8. Графики скоростей вблизи микроволновой антенны, полученные из интерферограммы, имели весьма схожую форму. Поскольку как количество выделившихся летучих, так и их состав [6, 15] зависят от скорости нагревания частиц, которая меняется от эксперимента к эксперименту, а в каждом опыте (из-за постоянного усиления ведущей волны) — вдоль длины измерительной секции, трудно выбрать подходящую основу для определения влияния состава. Поэтому состав был представлен как отношение масс летучих (на основе приближенного анализа) к массе кислорода λ и массы угля к массе кислорода λ^* . Каких-либо существенных особенностей на графиках не выделено.

Из рис. 7 и 8 (аналогично обычному выводу пределов воспламенения из графиков ламинарной скорости горения в зависимости от состава) посредством экстраполяции к составу, при котором скорость спадает до величины, наблюдаемой в отсутствие угля, можно получить «бедный» предел детонации взвеси. Это величина $\lambda^* = 0,15$ или $\lambda = 0,08$. Гораздо

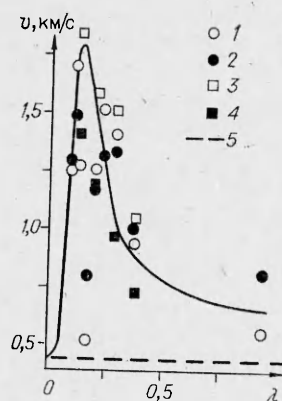


Рис. 7. Влияние содержания летучих и размера частиц на скорость ведущей волны.

1, 3 — средняя скорость между вторым датчиком и антенной; 2, 4 — скорость в точке расположения второго датчика; 5 — скорость в отсутствии угольной пыли, d_p мкм: 1, 2 — 54; 3, 4 — 25.

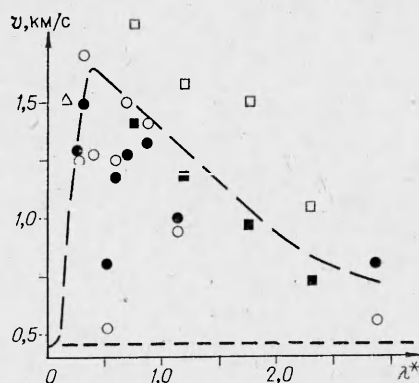


Рис. 8. Влияние концентрации угля на скорость ведущей волны. Обозначения те же, что и на рис. 6. Δ — максимальная скорость, полученная Неттлтоном и Стирлингом.

более пологий спад скорости с увеличением концентрации угольной пыли затрудняет определение «богатого» предела детонации. Для этого, очевидно, требуются дополнительные эксперименты со значительно более длинной измерительной секцией.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось ранее, ускорение пламени во взвеси угольной пыли было заметно нерегулярным. Это может быть результатом последовательности «взрывов во взрыве», описанных в [16] при изучении перехода к детонации в газовых смесях. Однако возможность случайного изменения состава взвеси вдоль оси трубы не может быть исключена.

И, наоборот, поджигание взвесей частиц обоих размеров происходило вполне воспроизводимо. При всех составах газовой смеси, отличавшихся от воздуха, поджигание имело место на расстоянии между 1,2 и 1,5 м от диафрагмы. Это можно объяснить нагреванием частиц до температуры зажигания ($T \approx 1000$ К [7]) в ударно-сжатом потоке газа (температуры T_g) посредством совместного действия теплопроводности и радиации продуктов детонации ацетиленокислородной смеси, имеющих температуру T_d . Поэтому, предполагая, что частицы сферические, прогреваются сразу по всему объему и что T_d не зависит от времени, имеем

$$\frac{dT_p}{dt} = B(T_g - T_p) + \frac{3\sigma\epsilon T_d^4}{4r_p^0 \rho_p c_p} \exp\{-n4\pi r_p^2 x\},$$

где B — константа, величина которой уменьшается с увеличением размера частиц, лежащая в пределах от $3 \cdot 10^3$ до 10^3 1/с для $r_p = 10$ и 20 мкм соответственно [7]; T_p — мгновенная температура частицы; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ϵ — эмиссионная способность продуктов газовой детонации; ρ_p и c_p — плотность частиц и их удельная теплоемкость; n — средняя величина плотности (числа частиц) в единице объема ударно-сжатого газа; x — среднее расстояние от контактной поверхности продуктов детонации до ведущей УВ.

Выбор типичной величины иницирующего скачка по скорости контактной поверхности ($M_s = 4,5$) дает скорость потока $M = 3,60$ и отношение температур на фронте 4,9. Теперь уравнение, описывающее скорость подъема температуры, можно решить и получить время зажигания, которое с использованием скорости потока превращается в расстояние, при неявном предположении, что частицы угля ускоряются мгновенно.

венно до скорости газа. При усредненной по времени температуре продуктов газовой детонации, равной 300 К и $\varepsilon = 0,1$, расчетные длины, на которых происходит поджигание, составляют 9,4 и 1,2 м для частиц размером 25 и 54 мкм (экспериментальные результаты — 1,2 м для обоих размеров). Хотя точное совпадение теории и эксперимента для больших размеров частиц, несомненно, носит случайный характер, возможные отклонения параметров от эксперимента к эксперименту таковы, что коэффициент 3 между теорией и экспериментом может рассматриваться как свидетельство справедливости теории.

На первый взгляд удивительно, что размер частиц и содержание летучих мало влияют на длину зоны воспламенения и наблюдаемые максимальные скорости детонации. Влияние разницы в характерном размере частиц на длину зоны воспламенения может компенсироваться изменением характерной формы, причем большие частицы имеют в среднем большее отношение площади поверхности к объему. В последнем случае возможно, что уменьшение содержания летучих компенсируется изменением размера частиц. Однако при обсуждении возможных причин необходима определенная осторожность, поскольку длина трубы в наших экспериментах не во всех случаях была достаточна, чтобы можно было с уверенностью считать, что достигнута максимальная скорость детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Микроволновая интерферометрия, ранее использовавшаяся только для прослеживания возбуждения газовой детонации, оказалась достаточно уместным, не возмущающим поток методом для регистрации перехода к детонации в пылевых взвесах.

2. Поджигание ограниченных взвесей угольной пыли взрывной волной, генерируемой инициирующим детонационным фронтом в стехиометрической ацетиленокислородной смеси, может быть описано на основе модели нагревания частиц в ударно-сжатом газе до температуры зажигания ~ 100 К посредством конвективной и радиационной теплопередачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Nettleton, R. Stirling. Comb. Flame, 1973, 21, 307.
2. S. Wojcicki, M. Zalesinski. Recent Developments in Shock Tube Research. Proc. 9-th Int. Shock Tube Symp. Eds. D. Bershader and W. Griffith, Stanford University Press, 1973.
3. M. Zalesinski, A. Kumierz, A. Teodorczyk e. a. 1-st Specialists Meeting Comb. Inst., 503, French Section. Comb. Inst., 1981.
4. M. Zalesinski, S. Wojcicki. Gas Dynamics of Detonations and Explosions. Eds. J. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim and R. I. Soloukhin. Prog. Astro. and Aero. V. 75, 1981.
5. V. P. Korobeinikov. Acta Astro., 1979, 6, 931.
6. G. M. Kimber, M. D. Gray. Comb. Flame, 1967, 11, 360.
7. M. A. Nettleton, R. Stirling. Proc. Roy. Soc., 1971, A322, 207.
8. E. A. Ural. Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1981.
9. D. H. Edwards, P. Fearnley, G. D. Thomas e. a. 1-st Specialists Meeting Comb. Inst., 431, French Section, Comb. Inst., 1981.
10. M. Godridge, S. Badzioch, P. G. W. Hawksley. J. Sci. Instr., 1962, 39, 611.
11. D. H. Edwards, E. M. Job, T. R. Lawrence. Nature, 1962, 195, 372.
12. D. H. Edwards, G. Hooper, R. J. Meddins. J. Phys. D., 1970, 3, 1130.
13. M. A. Nettleton. Arch. Term. Span., 1975, 6, 457.
14. M. A. Nettleton. Comb. Flame, 1977, 28, 3.
15. H. Jüntgen, K. H. Van Heek. Fuel, 1968, 47, 103.
16. P. A. Urtiew, A. K. Oppenheim. Proc. Roy. Soc., 1966, A295, 13.

Поступила в редакцию 17/II 1986