

О ВЛИЯНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

В. М. Бойко, С. В. Поплавский

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано воспламенение смесей металлических порошков с жидкими углеводородными топливами в атмосфере чистого кислорода и воздуха за отраженными ударными волнами. Показано, что задержки воспламенения смесей определяются жидкой фазой, а времена горения — в основном дисперсным составом твердой фазы.

В связи с взрывоопасностью порошковых материалов большое внимание уделяется исследованию характеристик воспламенения и горения пылевзвесей в ударных волнах (УВ). Важнейшими из них являются зависимости задержек воспламенения t_{ig} от температуры газовой фазы и концентрации кислорода. Большая часть эмпирических данных получена в стационарных условиях — в нагреваемых кварцевых трубках, горелках и т. п. Эти исследования позволили выявить основные кинетические закономерности окисления большого числа металлов с низкой температурой воспламенения и высокой теплотворной способностью (Al, Mg, Ti, Zn, Mn, и т. п.), разнообразных органических пылей и жидких аэрозолей. При этом темп прогресса был сравнительно невысок, а измеряемые задержки воспламенения значительно превосходят наблюдаемые в ударных трубах. Однако для расчета задержек воспламенения в УВ представляет интерес кинетика окисления металла за время длительности УВ, а не через секунды или минуты, как это обычно имеет место в стационарных условиях.

Исследованию характеристик воспламенения газозвесей жидких и твердых материалов за проходящими и отраженными УВ посвящено сравнительно небольшое количество работ (см., например, [1, 2]). Основная цель этих исследований — установить склонность различных гетерогенных смесей к детонации, что определяется из сопоставления значений t_{ig} для пылегазовых смесей с таковыми для газовых смесей, взятых в качестве эталонных. Большинство имеющихся эмпирических результатов по задержкам воспламенения металлических пылей в УВ находят свое объяснение в механизме теплообмена с газовой фазой, а следо-

вательно, являются предсказуемыми в той мере, в какой в расчетной модели удастся учесть особенности поведения газа и частиц при взаимодействии УВ с дисперсной системой. В наиболее общей форме эти особенности включают в себя совокупность физических процессов при формировании равновесной двухфазной смеси за фронтом УВ, распространяющейся в дисперсной системе. К ним относятся процессы смесеобразования, а также механизмы скоростной и тепловой релаксации фаз, которые если и не изучены детально, то в большинстве своем известны.

Существуют, однако, и «нерасчетные» режимы внезапного самовоспламенения частиц, которые из-за своей непредсказуемости и по характеру развития процесса также представляют известную опасность. Так, в работе [3] описан аномальный режим воспламенения порошков алюминия в кислороде за отраженными УВ при температурах значительно ниже критической ($T_{кр} \approx 1800$ К). Отметим его характерные особенности: малая доля воспламенившихся частиц (причем не одинаковая от опыта к опыту); одновременное воспламенение частиц разного диаметра, в том числе сравнительно крупных; плохая повторяемость результатов, а именно большой разброс задержек воспламенения в одинаковых условиях экспериментов. Все это свидетельствует о выражено неустойчивом поведении системы, которое, вообще говоря, характерно для любой реагирующей смеси при критических условиях воспламенения. При этом могут стать существенными не осредненные параметры системы, а такие привходящие факторы, как локальный перегрев среды, дефекты поверхности и формы частиц, присутствие малой доли инородных частиц и пр.

Сам по себе эффект аномального «низкотемпературного» воспламенения отдельных частиц мог бы представлять чисто академический интерес, если бы при некоторых условиях не вызывал хорошо повторяющийся режим воспламенения всего образца [3]. Это обстоятельство попросту расширяет температурный диапазон воспламенения металлических пылей, а по опасности ставит явление аномального воспламенения в один ряд со «штатными» режимами. В работе [3] установлено, что одним из условий поджигающего влияния аномальных частиц на основную массу образца является высокая концентрация пылевзвеси, однако собственно природа аномальных частиц неизвестна. Более того, механизмов аномального воспламенения может быть несколько. В качестве одного из них в настоящей работе исследуется инициирование «низкотемпературного» воспламенения алюминиевых и магниевых порошков в УВ за счет легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Данная работа продолжает исследования [3–5] и использует описанные в этих работах методы импульсной многокадровой теневой съемки и фотохронографии для регистрации пространственно-временной картины воспламенения пылевзвесей за УВ на уровне отдельных частиц.

Излучение горящих частиц регистрировалось через стеклянное окно размером 4×100 мм камерой ЖФР-1, работавшей в штатном режиме фотохронографа. Для синхронизации процесса с моментом прихода УВ к отражающей стенке, а также для введения временного масштаба применялся лазерный стробоскоп. Первый импульс генерации появлялся через 100 мкс после прихода сигнала с пьезодатчика, установленного на отражающей стенке. Изображения световых меток видны в верхней части фоторазверток.

Опыты выполнены со следующими образцами металлических пылей:
— порошок Al марки АСД-1 чистотой 99,2% с частицами сферической формы, рассеянный на узкие фракции при помощи воздушно-центробежного классификатора; использовались фракции $3 \div 5$ и $10 \div 14$ мкм;
— сферодизированный порошок Mg фракции $40 \div 63$ мкм, полученный рассевом через сита.

В качестве горючих жидкостей использовали керосин, изопропилнитрат ($C_3H_7NO_2$) и

тридекан ($n-C_{13}H_{28}$) — химически чистый предельный углеводород, входящий в состав керосинов и других жидких топлив.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Влияние ЛВЖ на предвоспламенительный разогрев металлических частиц в отраженных УВ исследовали поэтапно, начиная с концентраций, характерных для суспензий, с последующим уменьшением доли жидкости в системе вплоть до величины $\varphi < 10^{-2}$, когда лишь небольшая часть образца смочена ЛВЖ.

Воспламенение суспензий. Жидкая смесь углеводородного топлива и порошка использовалась как модельный объект, поскольку дробление и воспламенение жидкого компонента такой системы в УВ ранее авторами детально исследовалось [6, 7]. В данной серии опытов каплю суспензии с постоянной массой тридекана 2 мг размещали в чашечке, которую закрепляли на тонкой вольфрамовой проволочке и устанавливали на уровне оси канала ударной трубы на расстоянии 70 мм от отражающей стенки. В проходящей УВ смесь распылялась, а воспламенение распыла наблюдалось в отраженной УВ.

На рис. 1 приведены типичные фоторазвертки этого процесса. Опыты проводили в одинаковых условиях при температуре и давлении кислорода в отраженной УВ соответственно $T_5 = 1370$ К и $p_5 = 2,6$ МПа, получаемых при числе Маха проходящей УВ $M = 3$. Температура выбрана равной критической температуре воспламенения Mg. Из приведенных фоторазверток видно, что

— воспламенение наблюдается как для чистого тридекана, так и для суспензий, причем содержащих не только Mg, но и Al, температура воспламенения которого ($T_{кр} \approx 1800$ К) значительно выше имеющейся T_5 за отраженной УВ;
— задержки воспламенения суспензий определяются жидкостью, а частицы металлических порошков в распыле воспламеняются на $20 \div 40$ мкс позже;

— время горения суспензии больше соответствующего времени для капли чистой жидкости и определяется дисперсностью и количеством порошка в капле.

Аналогичная картина имела место и для других ЛВЖ, таких как керосин, изопропилнитрат и т. д. Но более существенно то, что в присутствии ЛВЖ алюминий воспламеняется и при еще более низких температурах кислорода (рис. 2,а), а также в воздухе (рис. 2,б).

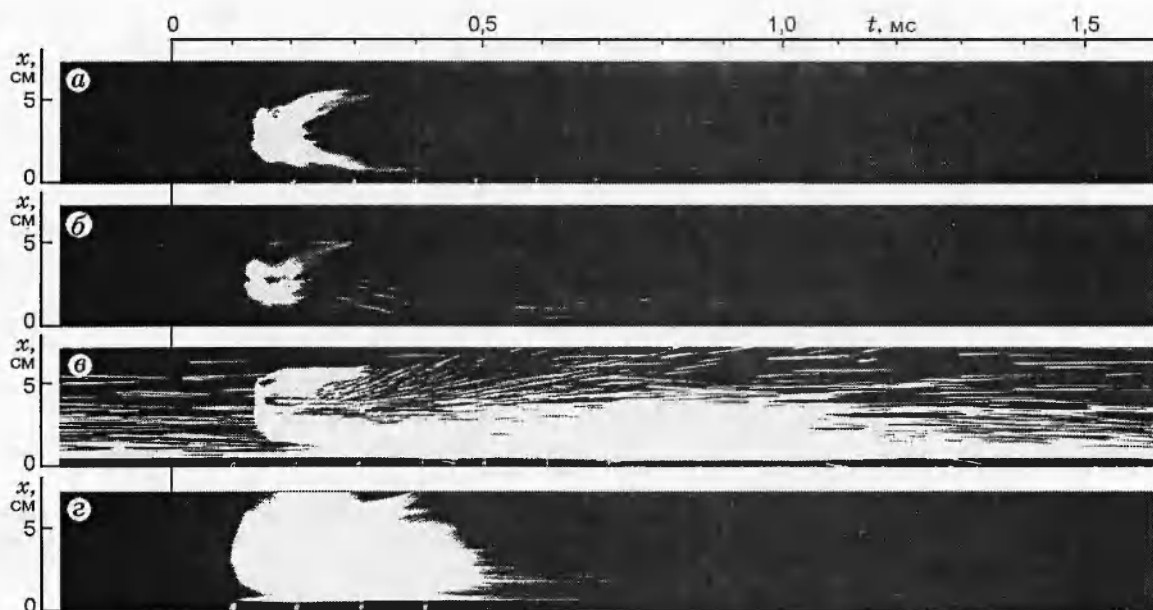


Рис. 1. Фоторазвертки воспламенения суспензий в кислороде:

$T_5 = 1370 \text{ K}$, $p_5 = 2,6 \text{ МПа}$; а — чистый тридекан (2 мг); б — 2 мг тридекана + 0,2 мг Mg; в — 2 мг тридекана + 2 мг Mg; г — 2 мг тридекана + 1 мг Al

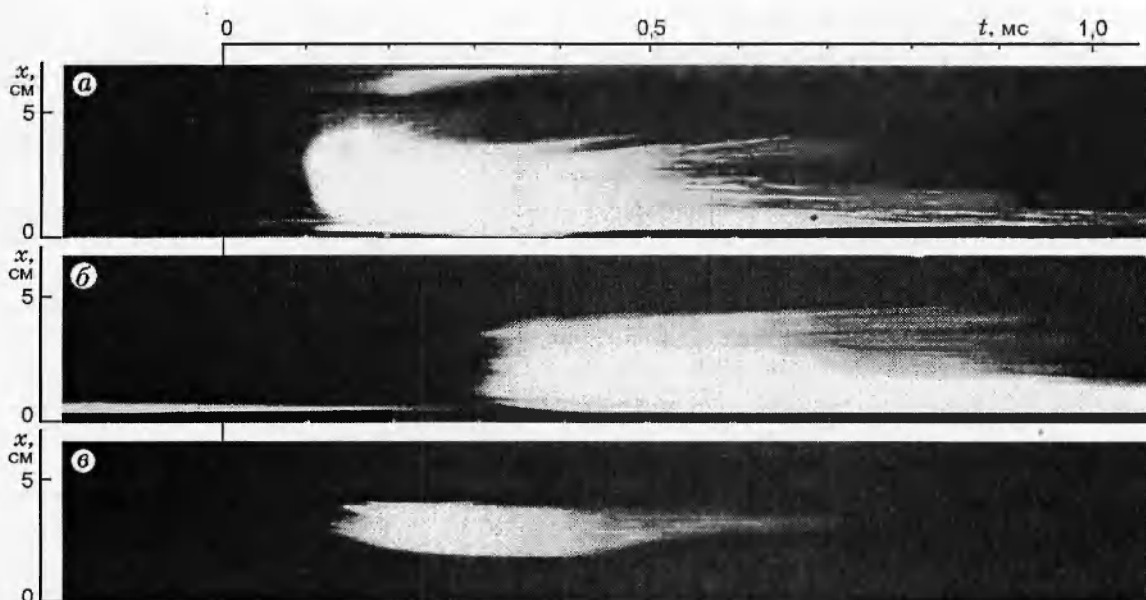


Рис. 2. Фоторазвертки воспламенения суспензий:

$T_5 = 1200 \text{ K}$, $p_5 = 4,2 \text{ МПа}$; а — кислород + тридекан + Al; б — воздух + тридекан + Al; в — воздух + изопропилнитрат + Al

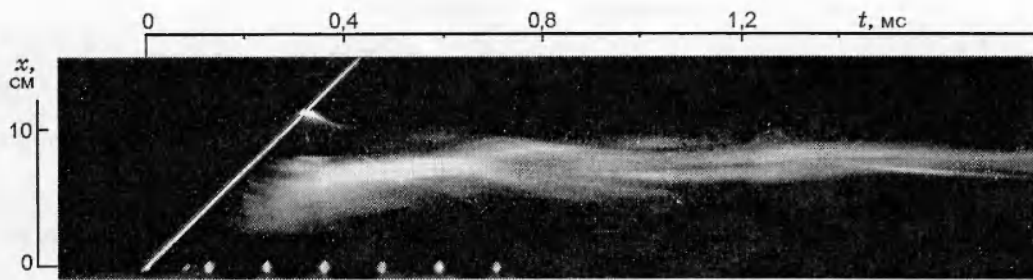


Рис. 3. Фоторазвертка воспламенения порошка алюминия и жидкой иницирующей добавки в воздухе при их раздельном расположении ($T_5 = 1500$ К, $p_5 = 2,0$ МПа)

Рис. 2 иллюстрирует воспламенение суспензии при температуре и давлении газа за отраженной УВ соответственно $T_5 = 1200$ К и $p_5 = 4,2$ МПа при числе Маха проходящей УВ $M = 2,8$. При этих параметрах УВ алюминий воспламеняется также и с изопропилнитратом, причем в этом случае задержка воспламенения уменьшается приблизительно вдвое по сравнению с тридеканом, что хорошо согласуется с поведением этих жидкостей в чистом виде.

Суммируя приведенные факты, отметим следующее:

- несмотря на то, что массы жидкости и металлических порошков сравнимы, влияния металлов на задержки воспламенения ЛВЖ не отмечено;

- при переходе от кислорода к воздуху увеличивается задержка воспламенения суспензии (\approx в 3 раза) и характер горения изменяется от взрывного в кислороде к дефлаграционному в воздухе; такое же поведение ранее отмечено и для чистого тридекана [7].

Таким образом, задержки воспламенения суспензий определяются соответствующими значениями t_{ig} для чистой жидкости. Нечувствительность параметров воспламенения ЛВЖ к присутствию значительной массы твердого компонента, связана, по-видимому, с особенностью дробления капли суспензии в проходящей УВ. Фактически в момент воспламенения ЛВЖ здесь имеет место трехфазная четырехкомпонентная (с учетом окислителя) система, горение в которой развивается по следующей схеме:

- воспламенение и горение паров ЛВЖ значительно поднимает температуру газовой смеси, что способствует дальнейшему испарению ЛВЖ и разогреву частиц твердой фазы;

- спустя $20 \div 40$ мкс после воспламенения па-

ров ЛВЖ температура некоторой части металлических частиц (наиболее мелких) поднимается до критического значения $T_{кр}$ и происходит их воспламенение;

- подъем температуры среды из-за горения мелких частиц вызывает дальнейший разогрев основной массы металлических частиц (до того же значения $T_{кр}$) и их воспламенение.

Присутствует ли в действительности ЛВЖ на поверхности частицы в момент ее воспламенения и оказывает ли какое-либо влияние пленка ЛВЖ на воспламенение частицы (поверхностное окисление, активация окисной пленки и т. д.), из приведенных данных не следует. Ниже приведены некоторые экспериментальные наблюдения, позволяющие ответить на эти вопросы.

Воспламенение неперемешанных компонентов топлива. Нечувствительность ЛВЖ к присутствию твердого компонента при воспламенении капли суспензии означает, что смесеобразование (дробление капли, испарение микрораспыла), а также воспламенение микрораспыла суспензии происходят по тем же механизмам, что и для чистых жидкостей. Приведенная выше схема процесса предполагает, что в микрораспыле ЛВЖ присутствует как в виде капель чистой жидкости, так и в виде пленки на частицах, однако последнее не влияет на воспламенение жидкой фазы. После воспламенения ЛВЖ частицы разогреваются по механизму теплопередачи, ограниченному теплопроводностью продуктов сгорания. Эксперименты по воспламенению заранее не перемешанных твердого и жидкого компонентов подтверждают правильность этого подхода.

На рис. 3 приведена типичная фоторазвертка воспламенения порошка алюминия и жидкой иницирующей добавки в воздухе при

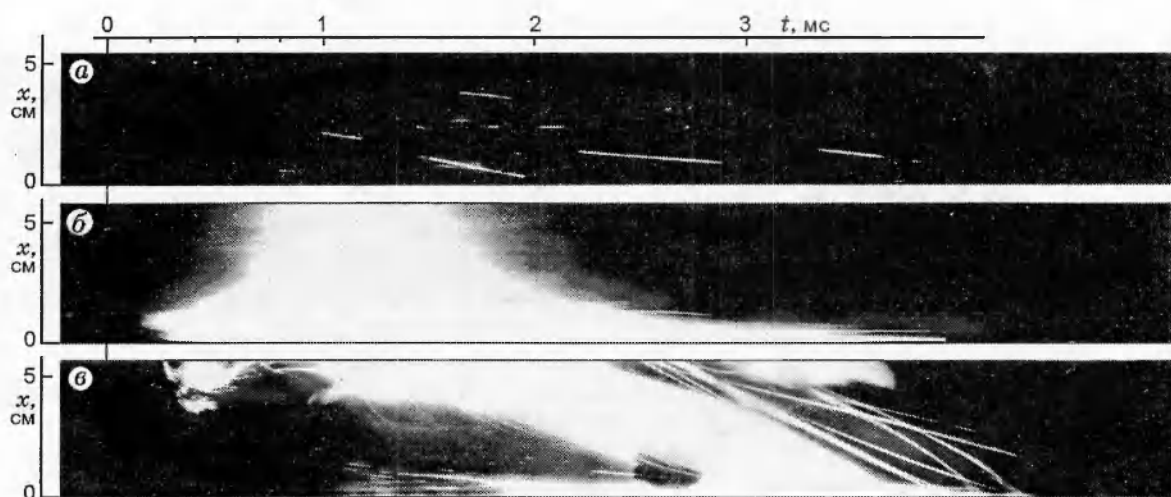


Рис. 4. Фоторазвертки воспламенения слоя порошка алюминия в кислороде:

$T_5 = 1100$ К, $p_5 = 3,4$ МПа; а — чистый Al; б — изопропилнитрат + Al при $L = 5$ мм; в — изопропилнитрат + Al при $L = 50$ мм

раздельном расположении порошка и жидкости в канале ударной трубы. Образец порошка АСД-1 массой 10 мг с дисперсностью $3 \div 5$ мкм располагали на плоской подложке на уровне оси канала, а каплю инициирующей жидкости массой 2 мг — на расстоянии 5 мм вверх по потоку. Число Маха проходящей УВ $M = 3,3$. Аналогичная картина наблюдалась и для других способов размещения компонентов. Данные опыты свидетельствуют о том, что смоченность порошка жидким топливом, а также способ раздельного размещения этих компонентов в исследуемом объеме не оказывают существенного влияния на задержку воспламенения и характер горения в системе.

Влияние ЛВЖ на воспламенение слоя порошка. Анализ взрывов пылевоздушных смесей в транспортных тоннелях элеваторов (мельниц, ТЭЦ и т. д.) показал, что для взрыва совершенно необязательно наличие заранее подготовленного к сгоранию объема пыли. Такая смесь способна образоваться при скольжении над слоями горючих пылевых отложений слабых УВ со скоростью газа $\approx 10 \div 20$ м/с. Тем самым, слабый исходный взрыв, приводя к подъему пыли и образованию горючей смеси с концентрацией, достаточной для распространения пламени, может быть причиной вторичного взрыва при условии возникновения пламени при сравнительно низких температурах. Таким образом, применительно к слоям роль ЛВЖ в низкотемпературном воспламене-

нии сводится к следующему: может ли малая доля примеси ЛВЖ спровоцировать воспламенение с последующим переходом в самоподдерживающийся режим горения за отраженной УВ, распространяющейся над слоем пыли.

В связи с этим была выполнена серия опытов по низкотемпературному воспламенению порошков Al, располагаемых в исследуемом объеме в виде тонкого слоя на нижней стенке канала. При этом малая доля ЛВЖ (≈ 1 мг) помещалась на слой порошка на различных расстояниях (L) от отражающего торца. Жидкость растекалась, смачивая незначительную часть образца пыли, оставшаяся часть сохранялась сухой.

На рис. 4 приведены типичные фоторазвертки воспламенения слоя порошка Al (фракция $10 \div 14$ мкм порошка АСД-1) в кислороде за отраженной УВ при $M = 2,6$, $p_5 = 3,4$ МПа, $T_5 = 1100$ К. На рис. 4,а зарегистрировано воспламенение чистого порошка Al, а на рис. 4,б,в — процесс, инициированный изопропилнитратом при $L = 5$ (б) и 50 мм (в). Помимо самого факта воспламенения и устойчивого горения алюминия эти фоторазвертки позволяют утверждать, что очаг воспламенения находится в месте начального расположения инициирующей добавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано воспламенение смесей металлических порошков и жид-

ких углеводородных топлив как в чистом кислороде, так и в воздухе. Показано, что задержки воспламенения смесей определяются жидкой фазой, а времена горения — в основном дисперсным составом твердой фазы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01886).

ЛИТЕРАТУРА

1. Borisov A. A., Gelfand V. E., Timofeev E. I., et al. Ignition of dust suspension behind shock waves // Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 94: Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. AIAA, 1984. P. 332-339.
2. Воланьски П. Воспламенение и горение органических пылей в ударных волнах // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 29-35
3. Бойко В. М., Лотов В. В., Папырин А. Н. Воспламенение газовзвесей металлических порошков в отраженных УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 67-74.
4. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. Воспламенение газовзвесей дисперсных материалов за ударными волнами // Тр. 1-го Междунар. коллоквиума по взрываемости промышленных пылей. Варшава, 1985. Ч. 2. С. 188-195.
5. Бойко В. М., Папырин А. Н. О воспламенении частиц магния за отраженными ударными волнами // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черногловка, 1986. С. 65-69.
6. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. О динамике дробления капель в ударных волнах // ПМТФ. 1987. № 2. С. 108-115.
7. Boiko V. M., Lotov V. V., Papyrin A. N. Ignition of liquid fuel drops in shock waves // Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 132: Dynamics of Deflagrations and Reactive Systems: Heterogeneous Combustion. AIAA, 1991. P. 205-219.

Поступила в редакцию 9/1 1997 г.