

ствованием можно пренебречь, но если она сравнима или больше Nd , то наличие пылевых частиц в газе начинает играть важную роль, существенно изменяя характер течения за волнами Чепмена — Жуге и пределы их существования.

Формулы (9) и (11) легко обобщаются на случай, когда содержание в газе частиц различных форм и размеров подчиняется соответствующей функции распределения ψ . Если частицы сферические, то численная концентрация частиц с радиусом в интервале от r до $r + dr$ равна $\psi(r)dr$. Заменяя в (11) $2\alpha_{i0}/d_i$ на $4\pi\psi(r)dr/3$, величины Nu_{iJ} , Re_{iJ} , C_{iJ} на $Nu_J(r)$, $Re_J(r)$ и $C_J(r)$, а знак суммирования на знак интегрирования по всем возможным размерам частиц, получим значение H для бесконечного количества сортов частиц, характеризуемых функцией распределения $\psi(r)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ФГВ, 1975, 11, 6, 909.
2. В. А. Копотев, И. М. Кузнецов. Докл. АН СССР, 1985, 282, 4, 865.
3. P. Laffite, K. Bonsef. 7-th Intern. Symp. on Combust., 1958.
4. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
5. А. М. Свалов. Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1976, 6, 71.
6. В. А. Куликовский. МЖГ, 1985, 4, 111.
7. S. Temkin, S. S. Kim. J. Fluid Mech., 1980, 96, 1, 133.
8. М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981.
9. Н. Н. Яненко, Р. И. Солоухин и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: Наука, 1980.
10. В. А. Левин, А. М. Свалов.— В кн.: Некоторые вопросы механики сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1978.
11. В. А. Куликовский. ПММ, 1985, 49, 2, 258.

Поступила в редакцию 27/III 1986

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ ПО ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБАХ

А. Г. Абинов, В. М. Плотников, Ю. Н. Шебеко,
О. Я. Еременко, Б. С. Фиалков, В. К. Муравлев,
А. Л. Абрамович, А. М. Чеховских

(Караганда)

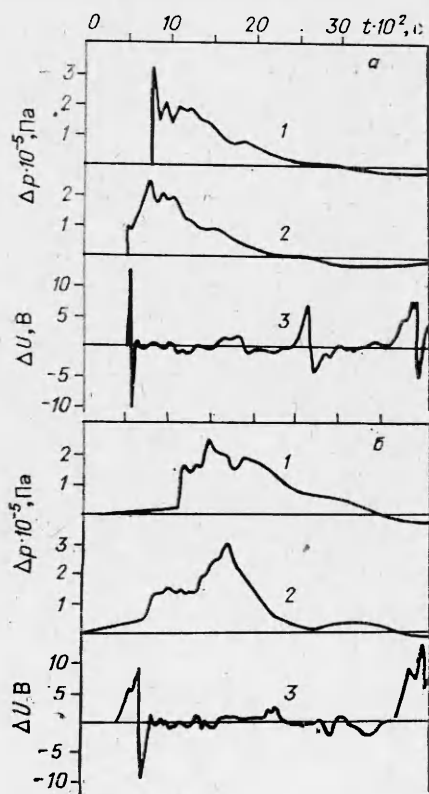
С точки зрения обеспечения взрывобезопасности ряда технологических процессов представляет интерес исследование параметров ударных волн (УВ), образующихся при быстром дефлаграционном горении газозвушных смесей, а также возможности перехода горения в детонацию. Хотя закономерности быстрого дефлаграционного горения со скоростями, близкими или даже превышающими скорость звука, исследуются уже давно (см., например, классические работы [1—3]), тем не менее до сих пор не удается с достаточной точностью описать зависимость видимой скорости пламени от состава смеси, геометрии объема, по которому распространяется пламя, наличия препятствий. В силу этого не удается предсказать и динамические характеристики взрыва (давление, импульс УВ, длительность положительной фазы), а также возможность перехода горения в детонацию в каждом конкретном случае.

Как показали проводимые в этой области физики горения и взрыва исследования [4—10], для получения правильных количественных данных, описывающих закономерности быстрого дефлаграционного

горения и переход его в детонацию, целесообразно использовать крупномасштабные полигонные установки, особенно в случае газов и паров с низкими нормальными скоростями горения (например, предельные углеводороды). В связи с этим настоящая работа посвящена изучению процессов формирования УВ при распространении пламени по топливно-воздушной смеси в трубах большого диаметра и длины. Особое внимание обращено на поиск взаимосвязи параметров УВ и волн давления (давление и импульс волны) с энергией, заключенной во взрывоопасном облаке.

Опыты проводили в ударных трубах с внутренним диаметром $D = 0,2; 0,9$ и $1,45$ м и длиной $48, 73, 100$ м соответственно. Один конец ударной трубы открыт в атмосферу, другой наглухо закрыт. Горение инициировали у закрытого конца трубы либо путем подрыва детонирующего шнура длиной $0,3; 0,4; 0,5$ и $2,0$ м (для труб различного диаметра), либо пережиганием проволоочки. В качестве горючей смеси использовали стехиометрическую смесь пропан-бутана с воздухом, занимающую часть трубы, отделенную от остальной части полиэтиленовой пленкой. Взрывоопасную смесь готовили напуском газа в изолированную часть трубы через газосчетчики. Равномерность концентрации горючего газа в смеси контролировали газоанализатором ШИ-10, оттарированным для пропан-бутана. Во всех экспериментах энергосодержание от источника инициирования было намного меньше энергосодержания горючей смеси и не превышало 150 кДж (длина шнура 2 м).

Для регистрации УВ использовали тензодатчики, расположенные вдоль трубы на различных расстояниях L от закрытого конца ($D = 0,2$ м — $L = 7,2; 9,25; 12,3; 15,05; 19,1$ и $24,6$ м; $D = 0,9$ м — $L = 7,6; 9,6; 19,4; 29,4$ м; $D = 1,45$ м — $L = 10; 20; 30$ и 50 м). Прохождение волны химической реакции по трубе фиксировали с помощью датчиков электрического потенциала, представляющих собой проволоочные зонды длиной $0,05$ м, введенные в газовую среду. При этом датчики потенциала и тензодатчики располагали в одном сечении трубы или по возможности в близких сечениях.



Длина загазованной области L_3 составляла в различных экспериментах от 4 до 30 м. В трубах с $D = 0,2$ и $0,9$ м имелись турбулизаторы. В трубе диаметром $0,2$ м турбулизатор выполнен в виде спирали из стального прута толщиной 12 мм. Шаг спирали $0,05$ м, общая длина участка трубы со спиралью $6,5$ м. В трубе с $D = 0,9$ м турбулизатор представлял собой хаотическое нагромождение металлических стержней, расположенное на расстоянии 5 м от закрытого конца трубы и имеющее длину около $1,5$ м. Это нагромождение закрывает сечение трубы более чем наполовину.

Методика проведения экспериментов более подробно описана в [11, 12]. Выбор для опытов ударных труб обусловлен тем обстоятельством, что, согласно [1—3], ускорение пламени, образование УВ и переход горения в дето-

Рис. 1. Осциллограммы изменения избыточного давления Δp и электрического потенциала ΔU при сильном (а) и слабом (б) инициировании взрыва; $D = 0,09$ м.

а) длина ДШ $0,5$ м, $L_3 = 14$ м; б) $L_3 = 18$ м. L , м: 1 — $19,4$, 2, 3 — $7,6$.

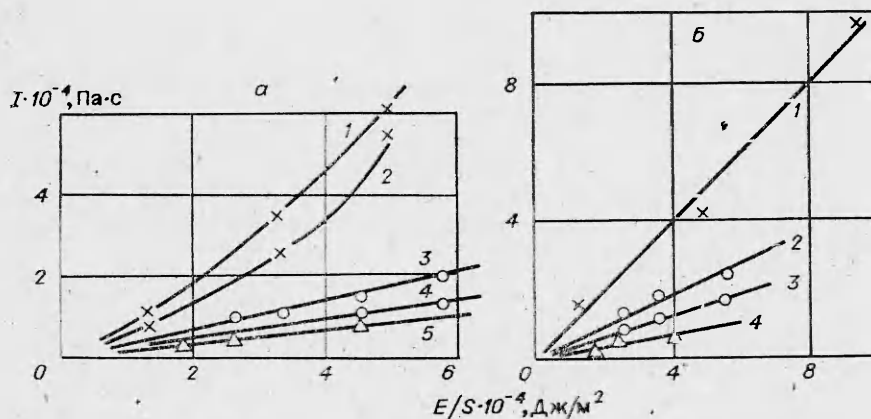


Рис. 2. Зависимость $I(E/S)$ при слабом (а) и сильном (б) иницировании.
 D , м: Δ — 0,2, \circ — 0,9, \times — 1,45. L , м: а) 1 — 10, 2 — 20, 3 — 19,4, 4 — 29,4, 5 — 19,1;
 б) 1 — 30, 2 — 19,4, 3 — 29,4, 4 — 19,1.

нацию более вероятны в трубе, чем в открытом пространстве. Это дает определенный запас надежности для практического использования результатов настоящей работы — обеспечения взрывобезопасности реальных технологических процессов.

На рис. 1 представлены типичные осциллограммы для случая сильного (детонирующий шнур) и слабого (пережигание медной проволоочки) иницирования. В первом случае УВ сформирована уже вблизи первого по пути следования пламени датчика давления. При слабом иницировании возникает волна сжатия с относительно пологим фронтом, причем крутизна фронта возрастает по мере распространения волны вдоль трубы. Структура УВ и волн сжатия довольно сложна, и в настоящей работе не дается ее детальное объяснение. Положительная фаза обеих волн характеризуется большой продолжительностью, конец положительной фазы определяется приходом волны разрежения от открытого конца трубы. Давление на заднем фронте УВ и волны сжатия невелико (по сравнению с давлением в пиках), поэтому учет заднего фронта при оценке разрушительного действия взрыва не представляет большого интереса. В связи с этим в настоящей работе импульс УВ и волн сжатия оценивается по уровню давления, превышающему (e^{-1}) от максимального в волне, по формуле

$$I = \int_{t_0}^{t_e} \Delta p(t) dt,$$

где t_e — момент времени, когда давление достигает значения $\Delta p = \Delta p_{\max} \cdot e^{-1}$. При распространении УВ и волны сжатия в незагазованной области вдоль трубы наблюдается затухание волны, обусловленное тепловыми и механическими потерями и носящее экспоненциальный характер. Затухание волн в трубах подробно исследовано в [11, 12] и в настоящей работе не изучалось.

Анализируя данные экспериментов, следует отметить высокие значения скоростей рассматриваемых волн (от 350 до 1200 м/с), причем отмечаются нерегулярные колебания их от опыта к опыту. Весьма высокой была и скорость волны химической реакции, причем также характерно ее нерегулярное изменение от опыта к опыту (в диапазоне от 40 до 600 м/с). Особенно велики нерегулярности при сильном иницировании горения. Колебания скоростей вызваны, вероятно, различиями в турбулизации горения при иницировании (что особенно существенно при сильном иницировании), а также влиянием неоднородностей концентрации горючего газа и взаимодействием пламени со стенками трубы.

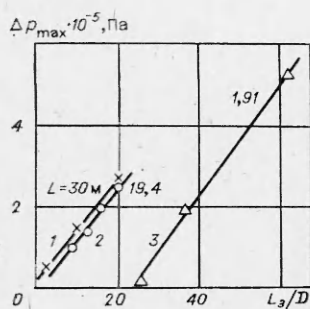


Рис. 3. Влияние длины загазованного участка трубы на величину Δp_{\max} (обозначение точек аналогично рис. 2).

Как следует из представленных на рис. 1 осциллограмм, волна химической реакции по времени достаточно хорошо совпадает с УВ. Отсюда следует вывод, что в наших экспериментах фиксируются реакции химионизации при нагреве горючей смеси в УВ. Общая картина распространения быстрого дефлаграционного горения в трубах может быть описана следующим образом.

При сильном или слабом инициировании горения на начальном участке трубы пламя существенно ускоряется. Детальный механизм ускорения в настоящее время неизвестен и в данной работе не исследуется. Ускорение пламени приводит к возникновению волны сжатия и в конечном счете УВ. Последняя вызывает нагрев горючей смеси во фронте и начало химической реакции, которая фиксируется датчиками потенциала — пассивными электрическими зондами. Однако интенсивность УВ или волны сжатия, которые наблюдались в настоящей работе, существенно ниже, чем в стационарной детонационной волне. При этом период индукции велик и смесь не успевает воспламениться, хотя химические реакции, обуславливающие самовоспламенение, протекают со скоростью, достаточной для заметной химионизации. Разгрузка, связанная с уменьшением давления в УВ или волне сжатия по мере ее прохождения по данному фиксированному слою горючей смеси, вызывает уменьшение температуры, затухание химической реакции, которая вновь реализуется при достижении пламенем указанного участка горючей смеси.

На рис. 1 обращает на себя внимание наличие сигнала от датчика потенциала спустя время $\sim 0,3$ с, что соответствует фазе разрежения. Этот сигнал, вероятно, связан с догоранием локальных участков смеси у стенки трубы, поскольку датчики потенциала находились в пристеночной области. Лидирующий же фронт горения находится в центральной части трубы, поскольку характерная скорость волны химической реакции (~ 100 м/с) и небольшие расстояния от точки воспламенения (~ 10 м) не позволяют предположить столь большого временного и пространственного разделения воли сжатия и реакции. Таким образом, зона реакции получается весьма длинной и турбулизированной, что подтверждают данные, полученные ранее.

На рис. 2, а приведена зависимость импульса УВ при сильном инициировании от параметра E/S , где E — запас химической энергии, содержащейся во взрывоопасной смеси; S — площадь поперечного сечения трубы. Видна монотонная, близкая к линейной зависимость. Наклон кривых увеличивается с уменьшением расстояния L от тензодатчика до закрытого конца и с ростом диаметра трубы. Это, вероятно, связано с ослаблением УВ при ее взаимодействии со стенками (механические и тепловые потери) [6]. Необходимо отметить, что максимальное давление в УВ при сильном инициировании нерегулярно меняется с изменением E и E/S . Это вызвано, по-видимому, различным уровнем турбулизации исходной горючей смеси при подрыве детонирующего шнура.

На рис. 2, б приведены аналогичные зависимости при слабом инициировании. Они могут быть качественно интерпретированы с помощью изложенных выше соображений.

На рис. 3 показано влияние параметра L_3/D на максимальное избыточное давление взрыва в волне сжатия. Видно, что экспериментальные точки укладываются на прямые, причем для труб диаметром 0,9 и 1,45 м они близки друг к другу. Это говорит о существенном влиянии потерь на распространение волны сжатия в трубе с $D = 0,2$ м, причем

с увеличением D это влияние относительно невелико. Интересно отметить, что наклон прямых для труб различных диаметров и положений тензодатчиков практически одинаков. Важность величины L_3/D для параметров волны сжатия и для перехода горения в детонацию отмечена также в работе [5].

В данных экспериментах ни в одном из взрывов не наблюдался переход горения в детонацию, что подтверждается относительно низкими скоростями распространения пламени и УВ (для сравнения укажем, что характерные скорости стационарной детонации для стехиометрических смесей многих органических веществ с воздухом составляют ~ 1800 — 1900 м/с [13]). Этот результат получен как при слабом, так и при сильном инициировании горения. В последнем случае энергия источника была, вероятно, ниже критической энергии прямого инициирования детонации (с учетом геометрии источника инициирования). В [5] показано существование критической скорости распространения пламени для перехода горения в детонацию в водородовоздушных смесях, которая составляет $v_{кр} \sim 800$ м/с. Такое критическое значение скорости должно существовать для перехода горения в детонацию в случае других газоздушных смесей. При этом следует ожидать, что для пропан-бутана, период индукции самовоспламенения которого в воздухе при воздействии УВ выше, чем для водорода [14], $v_{кр} > 800$ м/с. В настоящей работе зарегистрированы скорости волны химической реакции до 600 м/с, что обуславливает отсутствие перехода горения в детонацию.

При анализе возможности перехода горения в детонацию в стехиометрической смеси пропан-бутана с воздухом следует учесть, что в проведенных экспериментах в трубах имелись турбулизаторы, что, несомненно, благоприятствовало возникновению детонации. По-видимому, переход горения в детонацию при L_3/D , характерных для настоящих экспериментов, маловероятен. Аналогичный вывод можно сделать не только для пропан-бутана, но и для органических веществ сходного химического строения, периоды индукции самовоспламенения которых в ударных волнах близки к пропан-бутану.

Таким образом, в настоящей работе проведено исследование формирования УВ при распространении пламени в трубах, заполненных стехиометрической смесью пропан-бутана с воздухом, при сильном (детонирующей шнур) и слабом (пережигание медной проволочки электрическим током) инициировании горения. Найдены зависимости импульса и максимального давления в УВ и волне сжатия от длины загазованной области в трубе, диаметра трубы и расстояния до места инициирования горения. Переход горения в детонацию не обнаружен ни в одном из экспериментов при начальной энергии инициирования до 150 кДж и объеме взрывоопасного облака до 50 м³ даже при использовании ударных труб, снабженных турбулизаторами горения и имеющих диаметр ~ 1 м. Это говорит о нецелесообразности учета детонационных эффектов при оценке взрывоопасности широкого класса технологических процессов, в которых обращаются горючие газы и пары.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
2. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
3. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М.: Наука, 1963.
4. И. М. Абдурагимов, В. В. Агафонов, А. Н. Баратов и др. ФГВ, 1983, 19, 4, 39.
5. J. H. S. Lee, R. Knystantas, A. Freiman. Comb. Flame, 1984, 56, 2, 227.
6. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Лобань и др. Хим. физика, 1982, 6, 848.
7. I. O. Moen, J. H. S. Lee, B. H. Hjertager e. a. Comb. Flame, 1982, 47, 1, 31.
8. C. Chan, I. O. Moen, J. H. S. Lee. Comb. Flame, 1982, 49, 1, 27.
9. P. A. Urtiew, J. Brandeis, W. J. Hogan. Comb. Science and Technology, 1983, 30, 1, 105.
10. В. И. Макеев, Ю. А. Гостинцев, В. В. Строганов и др. ФГВ, 1983, 19, 5, 16.
11. А. Г. Абинов, Е. Н. Онтин.— В кн.: Проблемы аэрогазодинамики угольных шахт. Кемерово, 1984.

12. А. Г. Абинов, А. М. Чеховских.— В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзного семинара по электрофизике горения. Караганда, 1978.
13. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчийн. ФГВ, 1977, 13, 3, 393.
14. В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1980, 16, 5, 101.

Поступила в редакцию 22/VII 1985,
после доработки — 23/I 1986

УДК 662.235.5

ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВВ НА ЭНЕРГИЮ МЕТАЕМЫХ ПЛАСТИН

В. В. Даниленко, Ю. М. Пачурин

(Челябинск)

Обычно о неидеальности детонации говорят применительно к ее распространению в зарядах малого диаметра (меньше предельного), когда заметна боковая разгрузка зоны реакции [1]. В этом случае детонация может быть стационарной. Нестационарная детонация развивается от плоскости инициирования, т. е. в условиях воздействия на зону реакции задней разгрузки [2]. Такой режим неидеальный, т. е. характеризуется меньшими параметрами (волновая и массовая скорости, давление) по сравнению с максимально возможными для данного взрывного состава. Неидеальный и нестационарный режим детонации теоретически и экспериментально изучен мало, хотя на практике такой режим скорее правило, чем исключение.

Характер развития детонации определяется во многом способом инициирования заряда. При плосковолновом инициировании (например, ударом пластины) давлением, меньшим, чем в точке Жуге для данного состава, в поверхностных слоях заряда идет реакционная ударная волна (УВ), которая на некоторой глубине, определяемой давлением инициирования, быстро переходит в стационарную детонационную волну (ДВ) [3, 4].

При инициировании заряда не по всей его поверхности, а с помощью инициатора относительно малого диаметра («точечного»), в заряде возникает сферически расходящаяся ДВ, скорость которой D растет с радиусом волны [4, 5—7].

Для «точечных» инициаторов можно назвать следующие причины неидеальности детонации:

- применение инициаторов менее мощных, чем состав заряда (с меньшими давлениями в точке Жуге);
- большая кривизна формируемого им детонационного фронта (расходимость потока — это тоже разгрузка);
- конечность размеров инициаторов, малая поверхность инициируемых зон относительно поверхности заряда, в связи с чем по краям зон возникают боковые разгрузки ДВ, вследствие чего некоторый объем поверхностного слоя заряда вокруг инициатора полноценно не детонирует. По этой же причине в криволинейных прутках ВВ с поворотами в местах поворотов наблюдается непрореагировавший объем состава [8]. Эта так называемая «темная зона» (без свечения ПВ на хронограммах) имеет ширину, равную критическому диаметру ВВ.

Проведенные различными авторами исследования детонации касаются измерений волновых и массовых скоростей, а также давлений.