

Рис. 2. Зависимость $W_{кр}$ от безразмерной температуры T/T_0 возбуждаемого газа.

блюдается аналогия с зажиганием горючих смесей слабым источником, для которого нужно создать в объеме $\approx l^3$ (l — тепловая толщина фронта ламинарного пламени) температуру не ниже адиабатической температуры горения [8]. Физическая природа данного явления, а также влияние других параметров, важных для инициирования ДВ (толщина газового слоя, доля энергии источника, перешедшей в кинетическую энергию газа) требует дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульяновский В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости // ФГВ.— 1980.— 16, № 5.— С. 101—113.
2. Atkinson R., Bull D. C., Shuff P. J. Initiation of spherical detonation in hydrogen — air // Combust. Flame.— 1980.— 39, N 3.— P. 287—300.
3. Lee J. H. S. Initiation of gaseous detonation // Annual Review Phys. Chem.— 1977.— 28.— P. 75—104.
4. Иванов М. Ф., Фортов В. Е., Борисов А. А. Численное моделирование развития детонации в газовых объемах конечной толщины // ФГВ.— 1981—17, № 3.— С. 108—116.
5. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Еременко О. Я. Расчет критической толщины газового слоя по отношению к распространению детонационной волны // Там же.— 1987.— 23, № 6.— С. 89—91.
6. Димитров В. И. Простая кинетика.— Новосибирск: Наука, 1982.— 381 с.
7. Николаев Ю. А., Тончиан М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // ФГВ.— 1977.— 13, № 3.— С. 393—404.
8. Вильямс Ф. А. Теория горения.— М.: Наука, 1971.— 615 с.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 9/XII 1991

УДК 662.4 : 621 — 64

С. П. Алексеенко, Д. И. Мацуков, В. Н. Яхимович

ДЕТОНАЦИОННАЯ ЯЧЕЙКА В НЕОГРАНИЧЕННОМ БЕНЗИНОВОЗДУШНОМ АЭРОЗОЛЕ

Проведена прямая регистрация детонационной ячейки в бензиновоздушном аэрозоле, созданном взрывным способом в неограниченном объеме. Получено, что значения критической энергии инициирования детонации в аэрозоле, рассчитанные по известной формуле, находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Зарегистрированные нерегулярные колебания размеров ячейки объяснены неоднородностью концентрации топлива.

Проблема прямого инициирования гетерогенной детонации ударной волной (УВ), имея очевидное научное значение, приобретает исключительную важность при решении прикладных задач взрывобезопасности. Зависимость исследуемого явления от многих факторов различной природы ставит эту проблему в разряд наиболее сложных как с точки зрения теоретического описания, так и экспериментального подтверждения выдвинутых гипотез. Значительные трудности и разногласия возникают уже на стадии построения качественной физической модели процесса,

причем наиболее остро это проявляется при рассмотрении систем, представляющих собой неограниченные полидисперсные распылы сложных углеводородов в воздухе.

Действительно, с точки зрения представлений, развитых для газовой детонации [1—6], не удается объяснить ряд особенностей поведения детонационных волн (ДВ) в аэрозолях: практически на порядок большая ширина зоны химических реакций, в 2 раза меньшая по сравнению с рассчитанной при условии полного сгорания горючего скорость детонации и т. п. [2]. Общеизвестно, что причина этих особенностей состоит в увеличении периода задержки воспламенения, который в системе газ — капли, помимо собственного периода индукции химических реакций t_i , включает время t_p физических подготовительных процессов (дробление и диспергирование капель, испарение, перемешивание и т. д.) [7].

В реальных ситуациях, когда образующиеся аэрозоли существенно неоднородны, величина t_p может изменяться в широком диапазоне, а в этом случае теряют смысл такие понятия, как средняя температура и период индукции химических реакций [8]. Кроме того, при испарении смесевых топлив возможны различные режимы, когда топливо испаряется либо по фракциям, либо как индивидуальное вещество [9]. Критические условия существования того или иного режима зависят при этом от размера капель и от параметров потока.

Вполне понятно, что в условиях существования таких неопределенностей использование кинетических данных по задержкам воспламенения [10, 11] или результатов экспериментального определения размеров автоколебательной ячейки, полученных в лабораторных условиях [3], может привести к значительным ошибкам в оценке энергии инициирования. С этой точки зрения, наиболее оправданным подходом к изучению процессов инициирования и распространения детонации в неограниченных нерегулярных аэрозолях представляется подход, основанный на непосредственном (прямом) измерении размеров детонационной ячейки в условиях, адекватных прогнозируемым реальным ситуациям. Отсутствие в литературе экспериментальных данных, полученных именно в таких условиях, объясняется, по-видимому, значительной сложностью и трудоемкостью в подготовке соответствующего методического и диагностического оснащения таких экспериментов.

Ниже представлены результаты прямой регистрации детонационной ячейки в облаке неограниченного нерегулярного бензиновоздушного аэрозоля, полученные в полевых условиях.

Условия эксперимента. В экспериментах аэрозольное облако формировалось взрывным способом. С этой целью в центре специально подготовленной площадки на некоторой высоте от ее поверхности устанавливалась цилиндрическая емкость с жидким углеводородным горючим (бензин Б-70), в центральной части которой располагался диспергирующий заряд из ТНТ. В такой постановке, варьируя соотношением масс заряда и горючего, можно стабильно получать аэрозольные облака кольцевой формы с достаточно надежно прогнозируемыми расчетным путем характеристиками. В экспериментах реализованы условия, при которых диаметр облака составил 20 м, а его высота 6 м, средняя по объему концентрация горючего — $0,08 \div 0,1$ кг/м³.

Детонацию инициировали зарядом из флегматизированного гексогена, расположенным внутри облака на расстоянии 4 м от его внешней границы. Прямая регистрация детонационной ячейки проводилась с помощью индикатора — специально подготовленного металлического листа размерами $1,5 \times 1 \times 10^{-3}$ м, уложенного и закрепленного на предварительно подготовленной песчаной подложке.

Регистрация избыточного давления во фронте ДВ и времени ее прихода в заданную точку облака проводилась датчиками типа ПД500КЗ, предварительно отарированными в диапазоне давлений $(0,1 \div 50) \times 10^5$ Па. Использовалась также скоростная киносъемка процесса двумя камерами СКС-1М (скорость съемки 1200—1800 кадр/с).

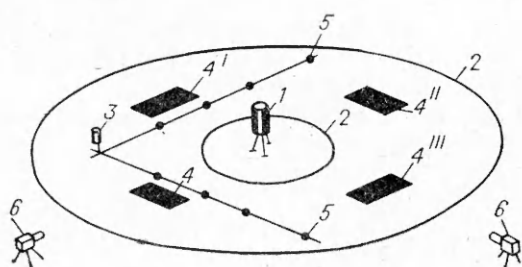


Рис. 1.

На рис. 1 представлена схема эксперимента, где 1 — емкость с горючим и диспергирующим зарядом; 2 — граница аэрозольного облака; 3 — инициирующий заряд; 4 — индикатор детонационной ячейки; 5 — датчики давления; 6 — камера СКС-1М.

Результаты экспериментов и их обсуждение.

Видимая скорость взрывного превращения по данным скоростной киносъемки $D = 1200$ м/с. Отмечено ее снижение до 300 м/с при выходе на границу облака. По данным датчиков давления максимальная скорость распространения ДВ $D = 1700 \div 1800$ м/с и снижается до 800—1000 м/с к границе облака. Отметим, что заметно меньшая величина D , зарегистрированная киносъемкой, объясняется, очевидно, существом данного метода, позволяющего наблюдать процесс в периферийной зоне облака (в большинстве случаев это фазовая скорость выхода фронта волны на внешнюю видимую границу), где из-за высокой степени нерегулярности его структуры распространение устойчивого детонационного процесса весьма проблематично. С этой точки зрения данные, полученные по показаниям датчиков давления, хотя и осреднены по базовым расстояниям между ними, безусловно более надежно соответствуют реальному процессу внутри облака. Зарегистрированные при этом пиковые значения избыточного давления во фронте ДВ колеблются в интервале $18 \cdot 10^5 - 30 \cdot 10^5$ Па.

Идея непосредственного измерения детонационной ячейки состояла в том, чтобы попытаться адаптировать известный метод «следового отпечатка» [11] к условиям экспериментов такого масштаба. При этом основная сложность заключалась в правильном выборе размеров и конструкции индикатора и в способе его сохранения в таких экстремальных условиях.

Зарегистрированная в наших экспериментах характерная деформация поверхности индикатора (рис. 2) позволяет уверенно идентифицировать ячеистую структуру, получаемую после прохождения многофронтной ДВ, при этом регистрируются ячейки ряда размеров, между которыми прослеживается взаимная упорядоченность ближнего порядка, что характерно для полидисперсных газочапельных систем.

В последующем структура упорядоченных ячеек переводилась посредством копирования углублений деформированной поверхности индикатора на лист бумаги. Типичный вид получаемых отпечатков, по которым измерялись размеры ячеек, приведен на рис. 3. Усредненные размеры детонационных ячеек, полученные в эксперименте, приведены в табл. 1. Усреднение размеров проводилось по группе ячеек, имеющих взаимноупорядоченную структуру. Видно, что, например, поперечный размер наблюдаемых ячеек может изменяться почти в 2 раза. Отношение про-

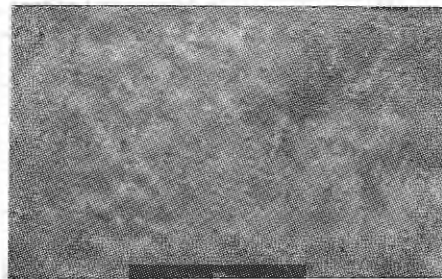


Рис. 2.

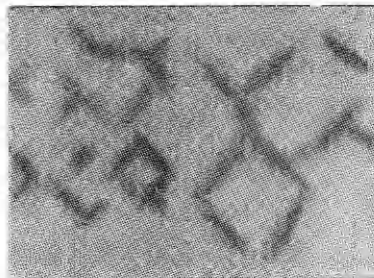


Рис. 3.

Таблица 1

Номер индикатора на рис. 1	Средний по группе поперечный размер ячейки (a), м	Средний по группе продольный размер ячейки (b), м	b/a
4	0,072±0,002	0,107±0,007	1,49±0,14
	0,054	0,080	1,48
4'	0,080±0,006	0,097±0,011	1,21±0,25
	0,062±0,002	0,080±0,002	1,29±0,08
4''	0,105±0,003	0,116±0,006	1,10±0,10
	0,052±0,002	0,084±0,002	1,62±0,10
	0,052±0,002	0,062±0,002	1,19±0,09
	0,046±0,004	0,063±0,003	1,33±0,19
4'''	0,098±0,006	0,120±0,010	1,22±0,19
	0,094	0,122	1,3
	0,086±0,004	0,112±0,002	1,30±0,09
	0,059±0,001	0,076±0,004	1,29±0,09

дольного размера b к поперечному a для большинства упорядоченных ячеек соответствует значениям, определяющим ячейку в нерегулярных структурах [12].

В табл. 2 представлены в пересчете на массу сосредоточенного заряда ТНТ результаты оценки критической энергии иницирования самоподдерживающейся детонационной волны, выполненные с использованием полученных экспериментальных данных по известному для топливоздушных смесей соотношению, полученному в [5]:

$$E_{*3} = 0,5 (E_0/RT)^3 \rho_0 D_0^2 b^3.$$

Принималось: $E_0 = 151,56$ кДж/моль, $D_0 = 1750$ м/с.

Выполненная оценка приближенная, поскольку в расчете использовано среднее значение скорости ДВ, в то время как зарегистрировано значительное колебание продольного размера ячейки, и более точно было бы каждому значению b сопоставить свое значение «мгновенной» скорости. Однако измерение ее в условиях экспериментов такого масштаба методически чрезвычайно сложно. С другой стороны, некоторую ошибку вносит неточность выбора величины энергии активации (указанное выше значение E_0 принято по данным работы [13] для гептановоздушной смеси). И если первое приближение несколько «сглаживается» с учетом существования продольной неустойчивости, то второе может быть оправдано лишь отсутствием в литературе более достоверных данных и, безусловно, требует уточнения. Тем не менее, несмотря на приближенный характер, полученные результаты оказываются весьма показательными с точки зрения качественного анализа.

Прежде всего примечательно, что все полученные в оценке значения E_{*3} находятся в хорошем соответствии с кривой масса иницирующего заряда ТНТ — концентрация горючего, полученной в работе [14] для регулярного бензиновоздушного аэрозоля. С одной стороны, этот результат еще раз подтверждает возможность использования приведенной формулы для предварительной оценки некоторой средней энергии ини-

Таблица 2

Номер индикатора	Энергия иницирования E_{*3} (кг ТНТ)	
	по группам ячеек	средняя
4	0,813	0,585
	0,356	
4'	0,606	0,473
	0,340	
4''	1,036	0,438
	0,393	
	0,158	
	0,166	
4'''	1,147	0,894
	1,205	
	0,932	
	0,291	

цирования даже с учетом указанных выше приближений, с другой — становится очевидной ограниченность применения данных работы [14] для прогнозирования развития процесса в нерегулярном аэрозоле, так как зарегистрированные значительные колебания размеров ячейки в пределах одного индикатора могут свидетельствовать об изменении пределов инициирования уже в малых, по сравнению с характерным размером облака, зонах.

К выводу о существовании зон, но уже большего масштаба с пониженной по сравнению со средней по облаку энергией инициирования приводит заметное отличие (от 0,481 до 0,894) средних значений E_{*3} для областей над различными (по месту положения) индикаторами, связанное, видимо, с макроскопическими колебаниями средней плотности топлива в аэрозоле, обусловленными возможной несимметрией в процессе взрывного диспергирования жидкости (динамика разрушения оболочки, неточность установки заряда и т. п.).

Конечно оба вывода могут рассматриваться лишь как предварительные, требующие дальнейшего всестороннего изучения, однако при прогнозировании или оценке реальных аварийных ситуаций их несомненно следует учитывать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Комианец А. С. Теория детонации.— М.: Гостехиздат, 1955.
2. Нетлетон М. Детонация в газах.— М.: Мир, 1989.
3. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчий М. Е. Детонационные волны в газах // ФГВ.— 1987.— 23, № 5.— С. 109—131.
4. Васильев А. А., Николаев Ю. А., Ульяницкий А. Ю. Критическая энергия инициирования многофронтной детонации // Там же.— 1979.— 15, № 6.— С. 94—104.
5. Ульяницкий В. Ю. О роли «вспышки» и соударения поперечных волн в формировании многофронтной структуры детонационных волн в газах // Там же.— 1981.— 17, № 2.— С. 12—133.
6. Борисов А. А., Заманский В. М., Лисянский В. В. и др. Кинетика выделения энергии при высокотемпературном воспламенении смесей углеводорода с воздухом и кислородом // Химическая физика.— 1988.— 7, № 5.— С. 665—673.
7. Ждан С. А., Митрофанов В. В. Простая модель для расчета энергий инициирования гетерогенной и газовой детонации // ФГВ.— 1985.— 21, № 6.— С. 98—103.
8. Губин С. А., Борисов А. А., Гельфанд Б. Е. и др. К расчету скорости детонации в смеси горючее — газообразный окислитель // Там же.— 1978.— 14, № 1.— 1990.— 26, № 2.— С. 103.
9. Тюльпанов Р. С. Расчет выгорания распыленного углеводородного топлива в форсированных топочных устройствах // Там же.— 1966.— 2, № 1.— С. 88—99.
10. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Фролов С. М. и др. Самовоспламенение распыленного жидкого топлива в ударных волнах с переменной температурой газа // Там же.— 1986.— 22, № 4.— С. 33—39.
11. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения.— М.: Изд-во АН СССР, 1963.
12. Митрофанов В. В. Теория детонации // Уч. пособие.— Новосибирск: НГУ, 1982.
13. Воронин Д. В., Ждан С. А. Расчет инициирования гетерогенной детонации в трубе взрывом водородокислородной смеси // ФГВ.— 1984.— 20, № 4.— С. 112—117.
14. Alekseev V. I., Dorofeev S. B., Sidorov V. P. et al. Experimental study of large scale unconfined fuel spray detonations.— М.: I. V. Kurchatov Inst. of Atomic Energy, 1990.

г. Дзержинск

Поступила в редакцию 24/1 1992,
после доработки — 12/III 1992