

В. М. Бойко, В. В. Лотов, А. Н. Папырин

### О МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ

Приведены результаты экспериментального исследования процесса распространения низкоскоростной детонационной волны по цепочке капель жидких углеводородов в атмосфере чистого кислорода. Детонацию инициировали плоской ударной волной при числе Маха  $M = 2,0 \div 3,5$ . Получены  $x, t$ -диаграммы, отражающие структуру детонационной волны. Обнаружен пульсирующий характер распространения фронта пламени и установлены причины наблюдаемого явления. Показано, что происходит не самовоспламенение микрораспыла в следе капли, а его зажигание продуктами сгорания от предыдущей капли.

Процесс распространения самоподдерживающихся детонационноподобных волн давления и горения во взвесах капель жидкого топлива в атмосфере газообразного окислителя, известный под названием гетерогенная детонация, изучается более 25 лет. Многочисленными исследованиями установлены основные закономерности в последовательности протекания физических процессов и построена качественная модель гетерогенной детонации в газочапельных системах [1, 2]. Согласно этой модели, капли ускоряются, деформируются и разрушаются под воздействием конвективного газового потока за лидирующим ударным фронтом. Микрораспыл, образующийся при разрушении, накапливается в следе за каплей. После времени индукции  $t_{ig}$  горючая смесь в следе взрывается, генерируя взрывные волны, распространяющиеся и в направлении лидирующей волны. Взрывная волна догоняет основной фронт, и устанавливается механизм его усиления.

Усиление лидирующей ударной волны (УВ), индуцированное взрывными волнами, порождает сильную связь между горением капли и детонационным фронтом. Наличие многих взрывающихся следов формирует большие колебания давления внутри реакционной зоны, что отличает гетерогенную детонацию в газочапельных смесях. Вторым характерным признаком — снижение скорости детонации  $D$  с увеличением размера капель  $d_0$ . Так, согласно [1], значение  $D$  газозвесей капель диэтилциклогексана (ДЭЦГ) в чистом кислороде близко к скорости газовой детонации ( $\sim 2100$  м/с), если  $d_0 \leq 200$  мкм, и в 1,5—2 раза меньше при  $d_0 > 2$  мм. При этом абсолютный минимум  $D \approx 1000$  м/с зафиксирован для капель с  $d_0 \approx 2,6$  мм при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha \approx 5$ . Однако наблюдаемое снижение величины  $D$  не получило удовлетворительного объяснения.

Структура зоны реакции при гетерогенной детонации в газочапельных смесях зависит не только от кинетики газовой реакции горения, но также и от влияния физики разрушения капли и испарения топлива. Детальные исследования процессов аэродинамического ускорения, деформации и разрушения одиночных капель в УВ (см., например, [3—5]) дают основания полагать, что механизм образования горючей смеси в зоне реакции достаточно хорошо изучен.

Что же касается химических процессов в зоне реакции и времен индукции самовоспламенения горючей смеси, то здесь остается много неясного. Значения  $t_{ig}$  для одиночных капель, полученные в отраженных [6, 7] и проходящих УВ [8], не согласуются с измеренными длинами зоны реакции в детонационных волнах (ДВ), распространяющихся по двухфазной смеси с крупными каплями [1]. Остаются неясными причины, обеспечивающие облегченные условия инициирования химической реакции за фронтом УВ в двухфазном потоке.

Предположение о наличии в области точки торможения газового потока на крупных каплях явлений типа «горячей точки», облегчающих воспламенение (см., например, [9]), не доказано и требует экспериментального подтверждения. Поэтому необходимы дальнейшие детальные исследования структуры и механизма распространения низкоскоростной ДВ в системе капли горючего — газообразный окислитель.

### Методика эксперимента

Опыты проводились в горизонтальной ударной трубе, оснащенной аппаратурой для оптической визуализации ударно-волновых процессов в двухфазных средах, фоторегистрации воспламенения и горения, регистрации профилей давления и измерения скорости УВ [5, 7]. Длина камеры низкого давления — 5 м, сечение канала  $52 \times 36$  мм, толкающий газ — гелий при давлении  $p_4 = 3,0 \div 9,0$  МПа, рабочий газ — кислород при  $p_1 = 0,05 \div 0,1$  МПа, число Маха УВ  $M = 2,0 \div 3,5$ . В качестве топлива использовался тридекан ( $n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$ ) — химически чистое вещество с низким давлением паров, по свойствам близкое к керосину.

Опыты [5, 7] показали, что способ введения капель в канал (свободное падение, подвешивание на тонких проволочках) не оказывает заметного влияния на процессы разрушения и воспламенения капель в УВ. Поэтому в данном цикле опытов капли с  $d_0 \approx 2,2$  мм подвешивали на тонких ( $\sim 0,15$  мм) вольфрамовых проволочках и размещали вдоль оси трубы. Расстояние между каплями  $10 \div 80$  мм, общая длина цепочки от 300 до 1000 мм.

Горючая смесь за фронтом УВ либо самовоспламенялась, либо поджигалась накаленной металлической проволочкой. В последнем случае проволочка на изолирующей подставке устанавливалась в ряду капель. Импульс тока подавался с задержкой относительно момента прохождения проволочки фронтом УВ. Задержки зажигания устанавливались оператором и варьировались в широких пределах, что обеспечивало хорошую повторяемость опытов и позволило регистрировать различные этапы распространения волны горения относительно фронта проходящей (иницирующей) УВ.

Наблюдение за динамикой взаимодействия УВ с цепочкой капель проводилось при помощи многокадровой теневой лазерной визуализации и совмещенной с ней фоторазвертки свечения пламени. При этом длительность экспозиции ( $\sim 30$  нс), число кадров и интервалы времени  $\Delta t$  между ними задавались лазерным стробоскопическим источником света [5, 7], а пространственное разделение кадров и фоторазвертка осуществлялись ждущим фоторегистратором с вращающейся зеркальной призмой. Схема синхронизации обеспечивала точную привязку генерации импульсов света относительно момента прохождения фронтом УВ исследуемой области. Сочетание этих методов позволило надежно регистрировать пространственно-временные характеристики процессов ускорения, деформации, разрушения, воспламенения и горения капель, форму фронта пламени, ударных и взрывных волн. Скорость УВ измерялась по времени прохождения базового расстояния между двумя пьезодатчиками и независимо по теневым фотографиям.

### Результаты

В [8] установлено существование предела для интенсивности проходящей УВ, ниже которого одиночные капли ДЭЦГ в атмосфере чистого кислорода не воспламенялись. Для капель с  $d_0 = 2,1$  мм он соответствовал  $M = 3,5$ . С другой стороны, минимальной скорости ( $\sim 10^3$  м/с) стационарной детонации в системе с цепочкой крупных ( $d_0 \approx 2,6$  мм) капель ДЭЦГ в атмосфере чистого кислорода [1] соответствует  $M = 3,1$ . Поэтому была выполнена серия опытов с целью выяснения предела самовоспламенения цепочки капель тридекана с  $d_0 \approx 2,2$  мм в атмосфере чистого кис-

лорода за проходящей УВ. Опыты показали, что горючая смесь самовоспламеняется в широком диапазоне чисел Маха проходящей УВ вплоть до  $M = 3,0$ . По-видимому, и это значение  $M$  не минимальное, а ограничено лишь параметрами данной установки. Характерные значения времени индукции самовоспламенения составляют  $t_{ig} \approx 360$  мкс при  $M = 3,3$  ( $T_2 = 860$  К,  $p_2 = 0,6$  МПа) и  $t_{ig} \approx 700$  мкс при  $M = 3,1$  ( $T_2 = 800$  К,  $p_2 = 0,5$  МПа), что соответствует данным по задержкам самовоспламенения одиночных капель тридекана в атмосфере чистого кислорода за отраженными УВ [7].

Данные опыты показали, что из очага самовоспламенения с большой скоростью распространяется фронт пламени, который, догоняя фронт инициирующей УВ, замедляется и трансформируется. Для детального изучения различных стадий распространения волны горения относительно лидирующего ударного фронта выполнена серия опытов с использованием поджигающей проволоочки.

Три характерные серии теневого фотографирования, отражающих разные этапы в распространении фронта пламени относительно фронта УВ, приведены на рис. 1. Все фотографии получены при одинаковых условиях опытов:  $d_0 \approx 2,2$  мм,  $l = 30$  мм, число капель  $N = 20$ ,  $p_1 = 0,1$  МПа,  $M = 2,6$ ,  $\Delta t = 10$  мкс, но при различных задержках зажигания смеси. На кадре 1 дано изображение капель до взаимодействия с УВ. На кадрах 1—26 представлены последовательные стадии деформации и разрушения капель и испарения распыленной жидкости за фронтом инициирующей УВ, движущейся слева направо (последовательные положения фронта УВ видны на кадрах 1—8). Здесь же представлено распространение волны горения, зафиксированное на тевых кадрах 23—26 (рис. 1, а), 13—17 (рис. 1, б), 5—12 (рис. 1, в) и наложенных на них фоторазвертках свечения пламени.

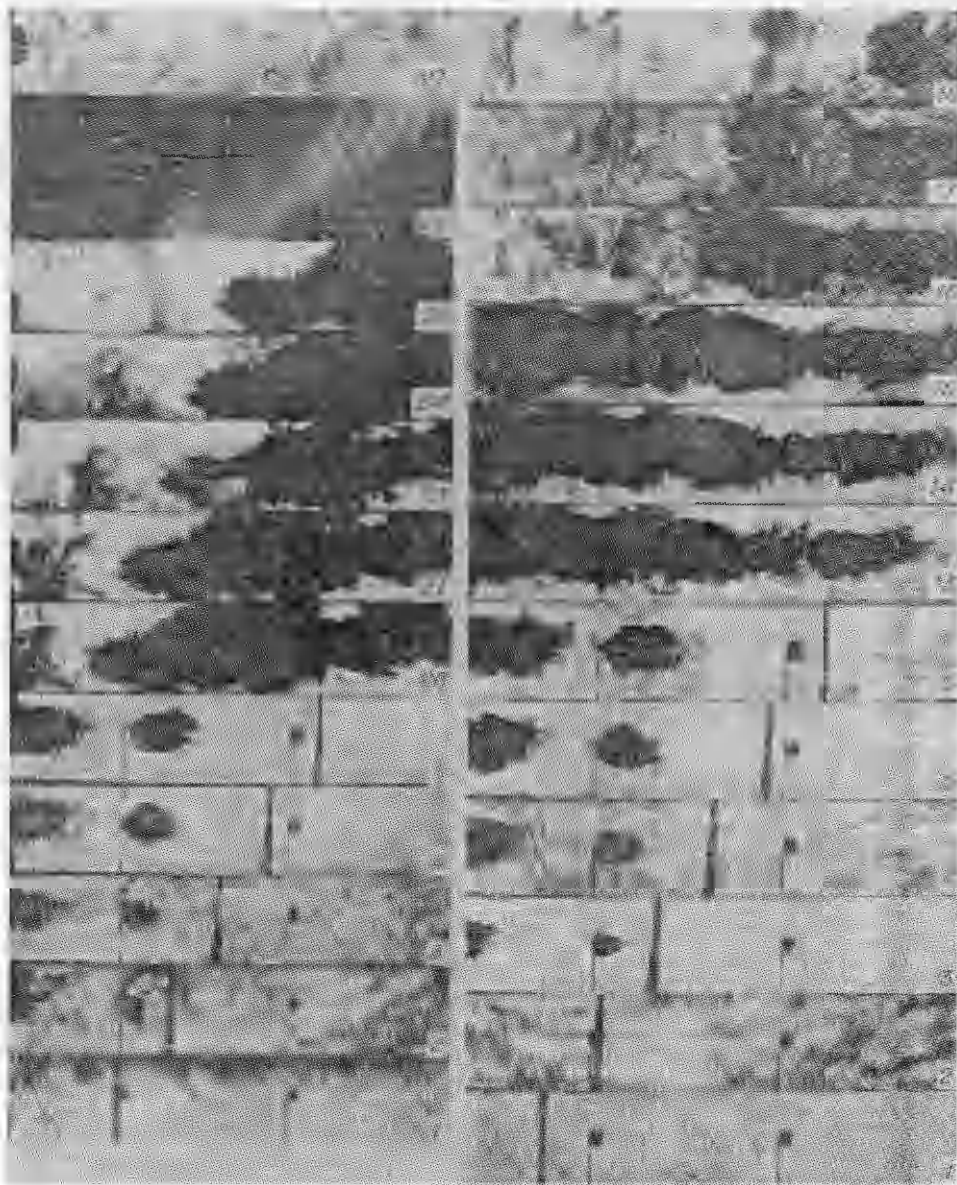
На рис. 1, а приведена выборка из серии фотографий, иллюстрирующая распространение волн горения при значительном отставании фронта пламени от фронта УВ. В области наблюдения фронт пламени появляется через время  $t_f \approx 220$  мкс от момента прихода фронта УВ. Для данной серии опытов характерное время аэродинамического разрушения капли  $t_b \approx 4,5t_0 \approx 190$  мкс. Здесь  $t_0 = d_0/u_2 \cdot (\rho/\rho_2)^{1/2}$ ;  $u_2$ ,  $\rho_2$  — скорость и плотность газа за фронтом УВ;  $\rho$  — плотность жидкости. Поскольку  $t_f > t_b$ , то к моменту прихода волны горения механические процессы распыления капли и подготовки горючей смеси полностью завершены. На кадрах 24 и 26 видно, что в продуктах сгорания за фронтом пламени конденсированная фаза отсутствует.

Согласно фоторазвертке на кадрах 23—26, скорость распространения фронта волны горения постоянна и в лабораторной системе координат  $D' \approx 2800$  м/с, а для относительно неподвижной горючей смеси  $D = D' - u_2 \approx 2200$  м/с. Эта величина соответствует скорости гетерогенной детонации в газочапельных смесях ДЭЦГ в кислороде с  $d_0 < 200$  мкм со стехиометрическим соотношением топлива и окислителя [1].

По мере приближения пламени к фронту инициирующей УВ сокращается время аэродинамического воздействия газового потока на капли, и процессы смесеобразования не успевают полностью завершиться. Так, на рис. 1, б время между фронтом УВ и фронтом пламени уменьшается от 140 мкс (кадр 14) до 100 мкс (кадр 16).

При этом видно, что начиная с  $t_f \approx 120$  мкс (кадр 15) капли разрушаются и сгорают не до конца. В продуктах горения присутствует конденсированная фаза (кадры 16—18), однако фронт пламени все еще распространяется с  $D' \approx 2800$  м/с, акустических возмущений впереди фронта не наблюдается.

При дальнейшем сокращении времени подготовки горючей смеси ( $t_f < 3t_0$ ) скорость пламени быстро уменьшается. На рис. 1, в представлена картина той стадии процесса, когда фронт пламени максимально близко приближается к фронту УВ ( $t_f \approx 30$  мкс) и начинает активно на него воздействовать. Детальное изучение подобных фотографий по-



казывает, что механизм распространения волны горения представляет собою серию последовательных микровзрывов в следах разрушения капель. Эти микровзрывы генерируют взрывные волны, догоняющие и подпитывающие ударный фронт (кадры 5, 8, 11). Отчетливо видно, что микровзрывы инициируются химически активными продуктами, образующимися при сгорании предыдущей капли.

На рис. 2 приведена диаграмма перемещений некоторых характерных точек процесса взаимодействия лидирующей УВ с цепочкой капель, соответствующая опыту, представленному на рис. 1, в. Здесь показаны перемещение ядра капли (1) и фронта УВ (2), границы взрывных волн (3), распыленного топлива (4), фронта пламени (5) и фронта пламени для опыта рис. 1, б (5').

Анализ фотографий и  $x, t$ -диаграмм (см. рис. 1, 2) показывает, что в следе каждой капли пламя распространяется от очага самовоспламенения с  $D' \approx 2800$  м/с, т. е. со скоростью, характерной для газовой детонации. Достигнув границы облака микрораспыла в следе капли, детонация гаснет, и далее распространяется акустическое возмущение в виде

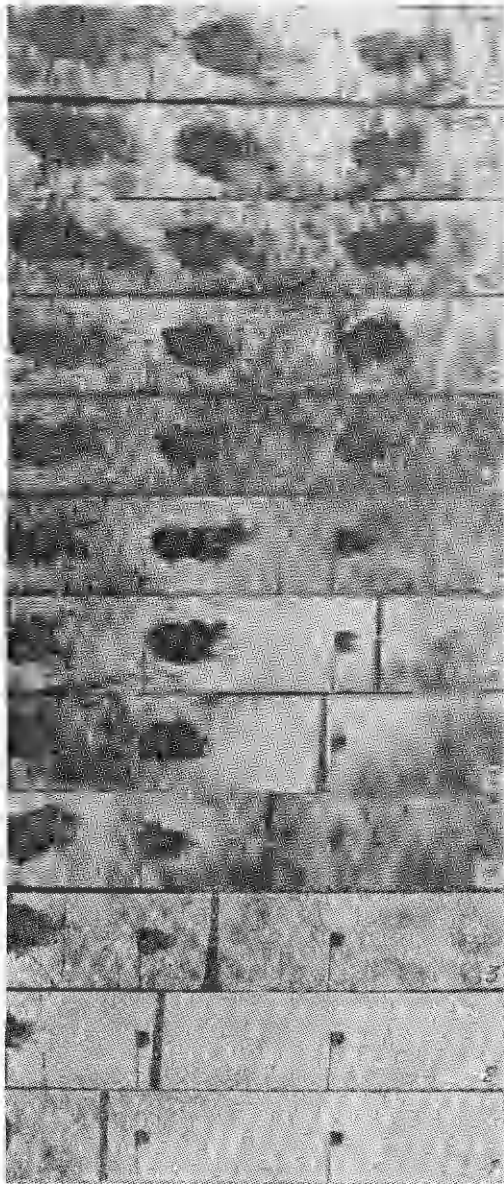


Рис. 1.

взрывной волны, а продукты детонации сносятся конвективным потоком со скоростью  $u_2$ . Волна горения носит пульсирующий характер, когда быстрое детонационное сгорание подготовленной горючей смеси в следе капли сменяется относительно медленным сносом продуктов горения до следующего очага воспламенения. При этом среднее значение скорости пламени равно скорости лидирующего фронта, и при  $D \sim 10^3$  м/с фронт пламени отстает от фронта УВ на 30—50 мкс. Следует отметить, что воспламенение происходит в момент достижения продуктами сгорания не ядра последующей капли, а некоторой области в ее следе, где, по-видимому, наиболее активно протекает процесс подготовки горючей смеси.

Таким образом, рассмотренный выше цикл экспериментов позволяет утверждать, что имеет место следующая качественная картина взаимодействия инициирующей УВ с цепочкой капель жидкого топлива:

— под воздействием спутного газового потока за фронтом УВ происходит разрушение капель, распыление топлива и образование горючей смеси;

— через время индукции, определяемое температурой газа за фронтом УВ, горючая смесь самовоспламеняется. При этом задержки самовоспла-

менения в проходящей УВ соответствуют  $t_{ig}$  в отраженной УВ при одинаковых значениях температуры газа за фронтом УВ;

— из очага самовоспламенения по горючей смеси распространяется волна горения с  $D \approx 2100 \div 2300$  м/с, которая догоняет фронт проходящей УВ;

— по мере приближения к фронту УВ скорость пламени замедляется, так как процессы разрушения капли не успевают завершиться, и топливо сгорает лишь частично. Смесь сгорает в виде разделенных во времени отдельных взрывов с генерацией взрывных волн, догоняющих фронт лидирующей УВ. При этом волна горения приобретает пульсирующий характер, когда быстрое взрывное сгорание подготовленной горючей смеси сменяется относительно медленным сносом продуктов горения до следующего очага воспламенения;

— воздействие взрывных волн на фронт УВ приводит к его ускорению и выходу на стационарный режим. В результате образуется комплекс из ударной волны и пульсирующего фронта пламени, который обладает всеми признаками рассмотренного выше режима низкоскорост-



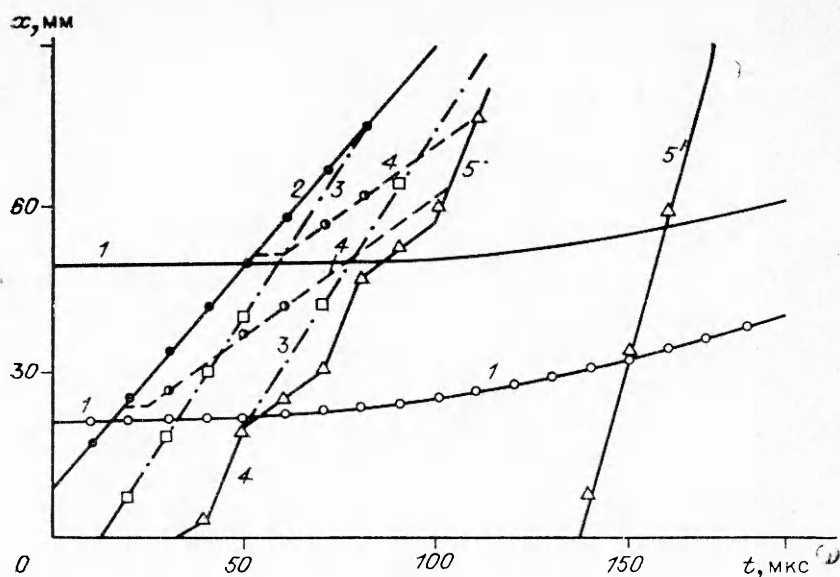


Рис. 2.

ной стационарной детонации в системе с крупными каплями топлива. Принципиальный момент данных экспериментов состоит в том, что в режиме установившейся низкоскоростной детонации горячая смесь не самовоспламеняется в следе разрушаемой капли, а поджигается продуктами сгорания от предыдущей капли. Следовательно, нет необходимости в поиске особых условий типа «горячих точек», облегчающих самовоспламенение в проходящих УВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dabora E. K. Fundamental mechanisms of liquid spray detonations // Fuel-Air Explosions.— Montreal: Univ. Waterloo Press, 1982.— P. 245—264.
2. Sichel M. The detonation of sprays: recent results // Ibid.— P. 265—301.
3. Runger A. A., Nicholls I. A. Aerodynamics shattering of liquid drops // AIAA J.— 1969.— 7, N 2.
4. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристики // ИФЖ.— 1974.— 27, № 1.
5. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. О динамике дробления капель в ударных волнах // ПМТФ.— 1987.— № 2.
6. Borisov A. A. et al. Selfignition of atomized liquid fuel in gaseous medium // Progr. Astron. Aeron.— 1983.— 88.— P. 436.
7. Boiko V. M., Lotov V. V., Papyrin A. N. Ignition of liquid fuel drops in shock waves // Ibid.— 1991.— 132.— P. 205—219.
8. Kauffman C. W., Nicholls J. A. Shock-wave ignition of liquid fuel drops // AIAA J.— 1971.— 9, N 5.— P. 880—885.
9. Митрофанов В. В. Детонационные волны в гетерогенных средах.— Новосибирск: НГУ, 1988.— 88 с.

г. Новосибирск

УДК 536.46 : 533.6 + 534.222.2

В. А. Субботин

### СМЕШЕНИЕ СВЕЖЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С ПРОДУКТАМИ РЕАКЦИИ КАК МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА

На качественном уровне рассмотрен механизм зарождения взрывных процессов в смеси фрагментов несгоревшего газа с продуктами реакции. Для экспериментального подтверждения предложенного механизма приведена шпиренкинограмма возникновения детонации в этой смеси. Отмечено, что эксперимент не согласуется с градиентным механизмом возникновения детонации.

© В. А. Субботин, 1993.