

15. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
16. W. Fickett, W. C. Davis. Detonation, California, 1979.
17. R. D. Cowan, W. Fickett. J. Chem. Phys., 1956, 24, 5, 932.
18. W. E. Deal. J. Chem. Phys., 1957, 27, 3, 796.
19. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 128, 5, 989.
20. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, 132, 1339.
21. W. V. Garn. J. Chem. Phys., 1960, 32, 3, 653.
22. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1961, 5, 117.
23. И. М. Воскобойников, А. Н. Кирюшкин, А. Н. Афанасенков и др.— В сб.: Доклады I Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. 1974.
24. J. K. Rigdon, I. B. Akst. 5-th Symp. (Intern.) on Deton. Pasadena, California, 1970.
25. B. L. Jameson, A. Hawkins. Ibid, 17.
26. S. J. Jacobs, D. J. Edwards. Ibid, 323.
27. А. А. Евстигнеев, М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев. ФГВ, 1976, 12, 5, 75.
28. Г. И. Канель. ФГВ, 1978, 14, 4, 113.
29. А. С. Державец, Э. Ф. Зарубина, Б. И. Шехтер.— В кн.: Взрывное дело. № 80/37. М.: Недра, 1978.
30. H. Hornig, E. L. Lee, M. Finger, J. E. Kurrle. 5-th Symp. (Intern.) on Deton. Pasadena, California, 1970.
31. И. М. Воскобойников, Н. Ф. Воскобойникова. ФГВ, 1977, 13, 1, 62.
32. A. Persson, P.— A. Persson. Symp. High Dynamic Pressures, Paris, 1967.

УДК 534.222

ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ДЕТОНАЦИОННЫЙ ФРОНТ

А. Н. Дремин
(Черноголовка)

Введение

Гидродинамическая теория явления детонации предложена и частично доказана в начале нашего столетия [1, 2], а в 40-х годах ее построение было завершено [3—5]. По этой теории, вещество испытывает превращение благодаря высоким температурам во фронте ударной волны, движущейся со скоростью детонации, при этом реакция инициируется и протекает одновременно по всему фронту волны. Вскоре после завершения создания гидродинамической теории обосновано существование пульсирующей детонации в газах [6—8] и обнаружена неустойчивость детонационного фронта в ряде жидких ВВ [9]. Неустойчивость означает, что не во всех физически однородных ВВ детонационный фронт является гладкой поверхностью раздела, что реакция во фронте детонационных волн некоторых ВВ осуществляется не одновременно по сечению заряда. В эксперименте это проявляется в неоднородном свечении и хаотическом искривлении поверхности детонационного фронта.

Гидродинамическая теория не могла дать объяснения новым экспериментальным фактам, оно пришло из эксперимента. При исследовании нестационарных явлений в детонации жидких ВВ открыто явление срыва химической реакции и установлено, что процессы инициирования детонации ударной волной, устойчивость и структура фронта, а также критический диаметр детонации жидких ВВ определяются этим явлением [9—11]. В настоящей работе рассматривается в деталях, хотя и качественно, как явление срыва определяет основные особенности структуры детонационного фронта.

Явление срыва химической реакции

В чем оно состоит? В большинстве взрывных процессов за фронтом ударных волн движется волна разрежения. Из-за адиабатического расширения вещество в волне разрежения охлаждается. Если это охлаждение превысит саморазогрев среды за счет реакции, она прекратится. Это и есть явление срыва [9—11].

Условие срыва записывается в виде [12]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{T,v} dk}{c_v dt} + \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_{s,h} \frac{dv}{dt},$$

где $Q_{T,v}$ — тепловой эффект реакции при постоянных температуре и объеме; k — доля прореагировавшего вещества; обозначения остальных величин общеприняты.

Из приведенного выражения видно, что расширение влияет на характер изменения температуры реагирующей среды во времени; оно как бы уменьшает теплоту реакции на $Q_1 = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_{s,h} \frac{dv}{dt} \frac{dk}{dt}$. Чем меньше скорость реакции $\left(\frac{dk}{dt}\right)$ и больше скорость расширения $\left(\frac{dv}{dt}\right)$, тем больше Q_1 . Очевидно, что если Q_1 окажется больше $Q_{T,v}$, то температура будет уменьшаться, и реакция прекратится.

Разложение ВВ в ударных и детонационных волнах, согласно представлениям гидродинамической теории, имеет тепловую природу и подчиняется закономерностям адиабатического теплового взрыва. Характер адиабатического теплового взрыва [13, 14] определяется двумя параметрами:

$$\gamma = \frac{RT_0^2 c}{EQ} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{RT_0}{E}.$$

Первый связан с глубиной предвзрывного разложения ВВ: чем он больше, тем больше глубина разложения. Уменьшение γ приводит к росту ускорения реакции в результате химического саморазогрева среды. Параметр β связан с начальной скоростью химической реакции: чем больше β , тем выше скорость. Уменьшение β увеличивает зависимость скорости реакции от температуры.

При нормальном тепловом взрыве ($\gamma \ll 1$ и $\beta \ll 1$, «медленная» кинетика, значения E велики, а T_0 малы) в развитии реакции разложения отчетливо проявляется период индукции, т. е. начальная скорость разложения в этом случае пренебрежимо мала, а после периода индукции реакция протекает со взрывом. Очевидно, незначительное разрежение может оказаться достаточным, чтобы сорвать химическую реакцию, не дать ей развиваться до взрыва (воспламенения).

Если параметры γ и β несущественно меньше единицы («быстрая» кинетика, значения E малы, а T_0 велики), реализуется так называемый вырожденный тепловой взрыв; при этом велики начальная скорость химической реакции и глубина предвзрывного разложения ВВ. Очевидно, что осуществить срыв в этом случае трудно; для этого необходима большая скорость разрежения.

Возникновение неустойчивости и структура неоднородностей

Будем считать, что параметры инициирующей ударной волны (давление и его градиент за фронтом) достаточны для возбуждения детонации. Случай, когда параметры ударной волны таковы, что реакция с самого начала не может развиваться, т. е., по существу, срывается само развитие реакции, очевидно, интереса в данном случае не представляет.

Известно, что нормальная детонация всегда возникает из пересжатого режима [9, 10]. Действительно, при любом способе возбуждения детонация в конечном счете инициируется ударной волной. Если давление инициирующей ударной волны меньше давления Чепмена — Жуге, то реакция вначале возникает в ударно-сжатом ВВ (УВВ), и это приводит к возникновению в исходном ВВ пересжатой детонации. С другой стороны, возникновение пересжатого режима очевидно, если давление инициирующей ударной волны выше по амплитуде давления нормальной детонации.

Какой фронт — устойчивый или неустойчивый — будет иметь детонационная волна в нормальном режиме, решается в процессе выхода волны из пересжатия. Если при переходе не происходит срыва химической реакции во фронте детонационной волны, то волна в нормальном режиме будет иметь устойчивый фронт. Детонационные волны с устойчивым фронтом обнаружены экспериментально [9]. В соответствии с приведенными рассуждениями, устойчивый детонационный фронт — явление более вероятное у мощных ВВ. Этот вывод следует из того очевидного соображения, что сорвать реакцию на детонационном фронте мощных ВВ труднее, чем в случае слабых ВВ, потому что на ударном фронте детонационных волн мощных ВВ начальная скорость химического разложения из-за высоких температур ударного сжатия больше («быстрая» кинетика), чем у слабых. Данное утверждение, очевидно, справедливо для близких значений кинетических констант слабых и мощных ВВ.

Если же при переходе пересжатой детонационной волны в нормальный режим химическая реакция на ударном фронте детонационной волны испытывает срыв, то волна в нормальном режиме будет иметь неустойчивый фронт. Неустойчивый детонационный фронт, как правило, имеют слабые ВВ [9]. У них начальная скорость химического разложения в ударном фронте детонационной волны существенно меньше («медленная» кинетика), чем у сильных ВВ, поэтому химическая реакция легко испытывает срыв.

В соответствии с гидродинамической теорией, во фронте детонационных волн в любом режиме существует область повышенных давлений, так называемый химпик [3]. Срыв химической реакции означает ликвидацию химпика. Продукты взрыва (ПВ) уже сдетонировавшей части ВВ, действуя как поршень, двигают в исходном ВВ ударную волну, что приводит к возникновению на их поверхности слоя ударно-сжатого ВВ (УВВ). Градиент давлений (скорость разрежения) в ударной волне меньше, чем в химпике, поэтому срыв может преодолеваться, и реакция в УВВ в виде адиабатического теплового взрыва (АТВ₁) может возникнуть снова.

Неустойчивость детонационного фронта, как это следует из вышесказанного, определяется кинетикой разложения ВВ (кинетическая неустойчивость), и она проявляется в самораспространяющемся режиме неизбежно. Если уж химическая реакция во фронте детонационной волны испытывает однажды срыв, то она будет подвергаться срыву и последующему реиницированию непрерывно. Покажем, как это происходит у ВВ с сильно неустойчивым детонационным фронтом. У таких ВВ реакция при всех давлениях ударного сжатия снизу (вплоть до детонационных) развивается по законам «медленной» кинетики. Поэтому в этом случае проявление АТВ₁ на границе раздела ПВ — УВВ приводит к практически мгновенному возникновению детонации УВВ, которая движется в слое от границы раздела ПВ — УВВ и догоняет ушедший вперед фронт ударной волны. Давление детонации УВВ p_2 значительно превосходит давление в химпике p_1 . Так, для нитрометана, у которого давление в слое УВВ при нормальной детонации близко к давлению Чепмена — Жуге ~ 130 кбар [9], давление в химпике p_1 , если бы детонационный фронт в нем был устойчивым, равнялось бы ~ 225 кбар, а $p_2 \sim 350$ кбар. Поэтому, когда слой УВВ сдетонирует, в исходном веществе опять возникнет спльно пересжатая детонационная волна. Реакция во фронте этой волны при выходе ее из пересжатия опять будет испытывать срыв, что приведет к возникновению нового слоя УВВ и последующей его детонации. Так события должны повторяться.

Однако одномерная неустойчивость по предложенному механизму, по-видимому, не реализуется. Дело в том, что из-за случайных причин (например, флуктуации температуры) АТВ₁ в УВВ возникает не одновременно по всей поверхности границы раздела ПВ — УВВ, а хаотично. В отдельных точках (местах) поверхности появляется множество АТВ₁. После их возникновения детонация из каждой точки распространяется в слое УВВ своеобразными полусферами. Они догоняют фронт ударной

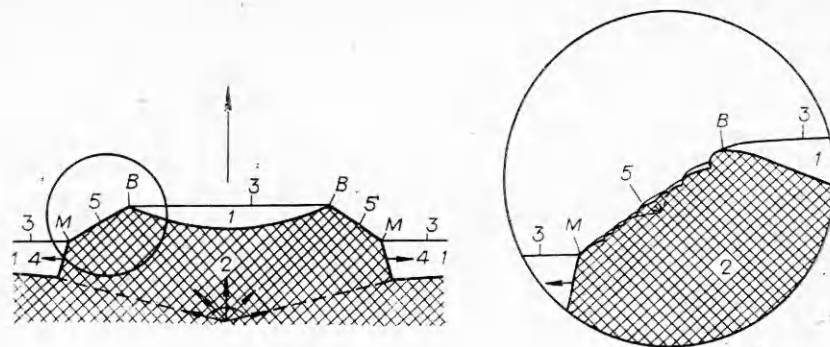


Рис. 1. Структура неоднородности неустойчивого детонационного фронта.

волны и вызывают в исходном ВВ расходящиеся сильно пересжатые детонации. Скорость разрежения за их фронтом, естественно, больше, чем в плоском случае, поэтому химическая реакция в таких волнах испытывает срыв еще легче.

Рассмотрим подробно, что происходит после срыва химической реакции в расходящейся пересжатой детонации. После срыва детонация в слое УВВ распространяется как круг от капли дождя по поверхности воды. Разрез этого круга по диаметру показан на рис. 1, где вертикальной стрелкой отмечено направление детонационной волны; расходящимися из одной точки стрелками обозначено место возникновения детонации в слое УВВ 1 в результате одной из множества АТВ₁ на границе раздела ПВ — УВВ. Цифра 2 обозначает продукты взрыва. Край каждого круга представляет собой трехударную конфигурацию. Прямая волна 3 — ударная волна, возникающая в исходном ВВ после срыва химической реакции. Ведущий элемент трехударной конфигурации — поперечная волна 4 — осуществляет детонацию слоя УВВ 1. Горизонтальными стрелками показано направление движения поперечных волн. Косая волна 5 — это пересжатая детонация, возникающая из-за бокового расширения продуктов взрыва за поперечной волной. По мере удаления от тройной точки М давление в области пересжатия за счет расширения продуктов детонации УВВ падает. На некотором расстоянии от тройной точки происходит срыв химической реакции за косой детонационной волной (точка В). Это приводит к отрыву фронта ударной волны от продуктов детонации, и давление в ней приближается к давлению в прямой ударной волне 3.

Срыв химической реакции в каждой полусферической детонации приводит к появлению и росту островков УВВ на поверхности детонационного фронта, расширяясь по фронту, они сливаются между собой, образуя сплошной слой УВВ. Однако, так как в начале АТВ₁ появляются хаотично, этот слой будет неодинаковой толщины, поэтому естественно, что последующие АТВ₁ опять появляются неодновременно, раньше они появляются там, где ВВ было в ударно-сжатом состоянии дольше (период индукции АТВ). Очевидно, возникшие при этом детонации УВВ успеют распространиться по большей поверхности фронта, захватывая соседние участки раньше, чем в них возникнет АТВ. Так, при выходе волны из пересжатия уменьшается количество АТВ на единицу поверхности детонационного фронта, а в нормальном режиме устанавливается некий средний размер максимальных неоднородностей.

В процессе перехода всей детонационной волны от первоначально пересжатого состояния до нормального режима процессы срыва и реиницирования химической реакции могут происходить многократно. Поскольку прямые участки трехударной конфигурации являются простыми ударными волнами, то волны разрежения с тыла могут свободно проникать на их фронт вообще в любом режиме детонации. Это означает, что при выходе детонационной волны из пересжатия давление на фронте прямых ударных волн так же, как и градиент давления за их фронтом,

в каждом последующем цикле срыва и реиницирования будет меньше.

Совместное влияние давления и градиента давления на период индукции АТВ определяет все возможные случаи зафиксированных в эксперименте закономерностей изменения среднего размера неоднородностей на детонационном фронте при выходе его из пересечения, когда детонация инициируется ударными волнами различной интенсивности и длины. Очевидно, что в зависимости от мощности инициатора (от этого зависит начальное давление инициирующей ударной волны) и его размеров (размеры определяют градиент давления в инициирующей волне) возможны два случая: плавное увеличение размера неоднородностей до размера, соответствующего нормальной детонации, и с максимумом.

Следует подчеркнуть, что, в соответствии с приведенными рассуждениями, срывные явления в расходящихся пересеченных детонациях на детонационном фронте будут происходить, и когда конечное давление за детонационным фронтом в целом поддерживается постоянным. Характерный максимальный размер пульсаций детонационного фронта, очевидно, будет минимальным и соответствовать идеальной детонации.

Структура сильно неустойчивого детонационного фронта

Поскольку АТВ₁ возникают на детонационном фронте хаотично, довольно быстро после зарождения соответствующие им кольцевые детонации из-за взаимных столкновений разбиваются на отдельные элементы круга. Действительно, трехударная конфигурация в данном случае возникает благодаря поперечной детонационной волне, а поперечная детонационная волна распространяется пока есть слой УВВ. Это означает, что отдельные элементы круговой детонации существуют только до момента встречи с аналогичными элементами других кругов.

Изложенные выше соображения дают уже довольно сложную картину структуры неустойчивого детонационного фронта. Однако в действительности она много сложнее. Дело в том, что косые детонационные волны, возникающие от АТВ₁, в свою очередь по механизму, изложенному выше, могут быть неустойчивы; процессы срыва и реиницирования реакции могут осуществляться на их поверхности многократно и одновременно. АТВ, возникающие в отдельных местах за их фронтом (АТВ₂), опять приводят к образованию круговых детонаций, естественно, более мелкого масштаба. Но в сечении теперь уже этих круговых детонаций опять будем иметь трехударные конфигурации, косые детонационные волны которых также могут быть неустойчивыми, и т. д.

Таким образом, в сильно неустойчивом детонационном фронте имеются АТВ различного порядка и соответствующие им различные трехударные конфигурации. Более того, если периоды индукции АТВ₁ в нормальном режиме детонации различаются сравнительно мало (они различаются, как уже говорилось, в силу случайных причин, которые вряд ли могут привести к их значительному разбросу), то в косых детонационных волнах трехударной конфигурации любого порядка размер неоднородностей, который определяется периодом индукции АТВ, меняется уже значительно. Действительно, косые волны являются пересеченными детонациями, но степень их пересечения, естественно, уменьшается по мере удаления от тройной точки. Поэтому период индукции АТВ с удалением от тройной точки возрастает, т. е. АТВ появляются реже. Наконец, на некотором расстоянии от тройной точки происходит окончательный срыв реакции за косой волной. По существу, с этого момента она прекращает быть косой детонационной волной и переходит в прямую волну, за которой впоследствии и возникает АТВ, опять приводящая к возникновению трехударной конфигурации того же порядка.

Из изложенного следует, что периоды индукции АТВ каждого порядка могут меняться от некоторого минимального (см. ниже) и до мак-

симального, который должен быть в соответствии с предлагаемой структурой существенно меньше максимального периода индукции АТВ предыдущего порядка, потому что АТВ каждого следующего порядка возникают при более высоком давлении, чем предыдущая, так как давление в косых волнах любой трехударной конфигурации больше, чем в прямой волне той же конфигурации, а АТВ последующего порядка возникают в слое УВВ за косыми волнами предыдущего порядка.

Ниже на примере детонации даже слабых смесей нитрометана с ацетоном, когда размер неоднородностей свечения фронта очень крупный, будет показано, что современной оптической аппаратурой (типа СФР) удастся наблюдать сверх основных АТВ₁ только АТВ₂. При этом обнаружено, что в экспериментах часто наблюдается движение трехударной конфигурации от АТВ₂ только в сторону тройной точки основной конфигурации, т. е. только в сторону возрастания давления.

Что касается минимальных размеров шероховатостей или кинетических пульсаций детонационного фронта, то о них в настоящее время сказать что-либо определенное трудно. По-видимому, они больше длины волны видимого света. Это следует из экспериментов по выяснению устойчивости детонационного фронта с помощью наблюдения отражения от него луча постороннего источника видимого света. Очевидно, если луч испытывает зеркальное отражение, то это значит, что размер шероховатостей детонационного фронта много меньше длины волны использованного света. Такой фронт, очевидно, кинетически устойчив. Действительно, трудно ожидать, что кинетико-газодинамические неоднородности, рассмотренные выше, будут мельче длины волны света, так как при этом допущении период индукции в таких неоднородностях окажется близким обратной частоте колебаний основных связей в молекулах ВВ, что нереально [9].

Конечно, неоднородности другой природы по размерам могут быть и существенно меньше длины волны света, но они будут влиять на устойчивость волны только косвенно, через изменение закономерностей кинетики разложения ВВ в детонационной волне. Например, твердо установлено, что в ударном скачке (примерно несколько десятков ангстрем) возникает сильно неравновесное состояние вещества [15—19]. Несмотря на кратковременность этого состояния, часть молекул ВВ может успеть разложиться; естественно, что это разложение имеет нетепловой характер [20]. Помимо частичного разложения вещества образовавшиеся в результате активные частицы — осколки молекул — могут оказаться центрами очагового развития реакции [21, 22]. Начальный размер очагов, очевидно, сравним с пространственным размером ударного скачка. Поэтому эти очаги вряд ли заметно исказят ударный фронт и течение за ним. Но частичное разложение вещества в скачке и очаговый характер последующего развития реакции, конечно, изменят кинетику разложения вещества в ударной волне, сделают ее отличной от кинетики в обычных условиях повышенных температур и давлений, но без ударных волн. В то же время устойчивость детонационного фронта определяется ударно-волновой кинетикой. Сведения о такой кинетике в настоящее время практически отсутствуют. Отчасти поэтому развиваемые в настоящей работе соображения имеют качественный характер.

Несмотря на то, что в сильно неустойчивом детонационном фронте имеются различные АТВ и соответствующие трехударные конфигурации, во всем этом видимом хаосе есть внутренний порядок. За этим порядком следят АТВ₁, которые определяют размер самых крупных пульсаций детонационного фронта. АТВ₁ определяют само существование детонационной волны с пульсирующим неустойчивым фронтом: если появление АТВ₁ будет сорвано, детонационная волна затухнет. Максимальный масштаб пульсаций на фронте пересжатой детонационной волны в различные моменты ее перехода в нормальный режим, в нормальном режиме и на фронте расходящейся сферической детонации также определяется АТВ₁ [9]. Последующие же адиабатические вспышки определяют тонкую

(сверхтонкую и т. д.) структуру конфигураций, возникающих от $АТВ_1$. Так, если $АТВ_2$ — адиабатические тепловые вспышки за косыми ударными волнами тройных конфигураций, возникающих¹ от $АТВ_1$, то $АТВ_3$ — адиабатические тепловые вспышки за косыми ударными волнами конфигураций, возникающих от $АТВ_2$, и т. д.

Переход от неустойчивого к устойчивому детонационному фронту

Как сказано выше, существуют жидкие ВВ с неустойчивым и устойчивым детонационным фронтом. Известно, что добавлением инертного вещества к ВВ с устойчивым детонационным фронтом можно сделать фронт неустойчивым [9]. Это происходит потому, что при разбавлении из-за уменьшения теплоты взрыва падает температура на ударном фронте детонационной волны. В результате снижается начальная скорость химического разложения и увеличивается вероятность срыва.

Неустойчивый фронт пересжатием можно сделать устойчивым. При пересжатии температура на ударном фронте детонационной волны и параметры $АТВ$ β и γ увеличиваются. Рост начальной скорости химического разложения приводит к тому, что при некотором пересжатии срыв химической реакции на ударном фронте детонационной волны преодолевается и фронт становится устойчивым.

Представляет интерес выяснить, как изменяется структура трехударных конфигураций при переходе от неустойчивого к устойчивому детонационному фронту. Допустим, что вначале фронт сильно неустойчив. Это означает, что во фронте детонационной волны возникают $АТВ$ и соответствующие им трехударные конфигурации различных порядков. В сильно неустойчивом детонационном фронте параметры $АТВ_1$, γ и β малы, т. е. $АТВ_1$ развивается по закономерностям нормального адиабатического взрыва. Детонация УВВ формируется при этом практически сразу у поверхности раздела ПВ — УВВ, где возникает $АТВ_1$. При пересжатии или увеличении мощности ВВ будет изменяться и количество, и «качество» $АТВ$; количество $АТВ_1$ растет, так как уменьшается период их индукции, а детонация в слое УВВ с ростом β и γ , т. е. с вырождением адиабатического взрыва, возникает с задержкой. Очевидно, что при определенном усилении детонационной волны в целом детонация в УВВ вообще не будет успевать сформироваться. Это произойдет, если реакция разовьется на границе раздела ПВ — УВВ относительно медленно, так что характеристики, несущие возмущения от реакции, не пересекутся внутри слоя УВВ, а по очереди достигнут ударного фронта прямой волны, как это имеет место, например, при инициировании детонации в тетранитрометане сильной ударной волной [10]. Однако, как и в последнем случае, этот процесс также может приводить к возникновению пересжатой детонации в исходном веществе и реакция в ней также может испытывать срыв.

После срыва на поверхности фронта детонационной волны опять появляется участок со слоем УВВ, и, таким образом, события могут повторяться, но тройные конфигурации в этом случае меняют структуру. Прежде всего, поперечная волна в них уже не является детонационной, и основным элементом конфигурации становится косая пересжатая детонационная волна. В таких конфигурациях часть ВВ может проходить за фронт волны и там сгорать.

Поскольку детонационная волна в целом в данном случае более сильная, естественно, что срыв химической реакции в косых волнах образующихся трехударных конфигураций происходит на большем относительно (относительно размера неоднородности) расстоянии от тройной точки. Поэтому косые волны конфигураций без поперечной детонационной

¹ $АТВ_2$ определяют тонкую структуру косой пересжатой детонационной волны спиновой детонации [6].

волны занимают большую часть поверхности детонационного фронта, а участки УВВ — меньшую, чем в случае сильно неустойчивых фронтов. С усилением волны поверхность фронта с участками УВВ еще более уменьшается, развитие реакции в них все более вырождается. Наконец, при дальнейшем увеличении мощности ВВ начальная скорость реакции становится настолько большой, что при выходе волны из пересжатия еще в процессе ее инициирования реакция во фронте уже не срывается, и поэтому волна в нормальном режиме становится устойчивой.

Специальные эксперименты показали, что искусственно созданные трехударные конфигурации без поперечной детонационной волны отличаются быстрым затуханием после образования [9]. Возможно, что на детонационном фронте они постоянно зарождаются и гибнут. Однако не исключено, что в стационарном режиме детонации они могут усиливаться при столкновениях и «проходить» друг через друга. Другими словами, возможно, что столкновения способствуют существованию трехударных конфигураций без поперечных детонационных волн. То же самое можно сказать и о конфигурациях с детонационной поперечной волной. Эксперименты показали [9], что на детонационном фронте конфигурации с поперечной детонационной волной также могут быть нестационарными; интенсивность некоторых из них при движении после зарождения уменьшается, и они часто гибнут. В жидких ВВ трехударные конфигурации часто гибнут при столкновении между собой (обе или одна), а новые появляются как результат последующих АТВ.

Из приведенных рассуждений можно сделать два вывода: 1) в сильно неустойчивом детонационном фронте конфигурации самого высокого порядка имеют структуру без поперечной детонационной волны; 2) по мере усиления исходной детонационной волны вначале будут исчезать (перестанут появляться) АТВ с соответствующие им конфигурации самого высокого порядка, затем предыдущего и т. д.

Неустойчивый детонационный фронт в смеси нитрометана с ацетоном

Нитрометан (НМ) и его смеси с ацетоном (А), а также практически все детонирующие газовые смеси являются примерами ВВ с сильно неустойчивым фронтом. В чистом НМ размер пульсаций детонационного фронта ($\sim 0,3$ мм по фронту) не удается наблюдать современными оптическими методами. Для смесей, содержащих 20% и более ацетона, пульсации регистрируются легко. На рис. 2 приведена фоторазвертка свечения детонационного фронта в смеси НМ/А 79,5/20,5 (в %) при начальной температуре смеси 12°C в прямоугольной по сечению бронзовой трубе 20×80 мм (взята из работы [23]).

Яркие с резкими краями линии (несколько из них отмечено цифрой 1) — свечение, соответствующее движению косых пересжатых детонационных волн самых крупных основных трехударных конфигураций, возникающих от АТВ. Видно, что свечение вначале однородное. По мере удаления от края линии появляются полосы, соответствующие тонкой структуре основных конфигураций, что означает неустойчивость косой волны этих конфигураций. Конфигурации более высокого порядка различать данным методом, очевидно, невозможно. На снимках, как правило, не видно и слабого свечения детонации УВВ, которое должно предшествовать яркому свечению косой волны [9, 24].

На рис. 2, 2 видно появление АТВ, которые создают новые основные трехударные конфигурации. Видно также, что многие из них на детонационном фронте неустойчивы; они подвержены непрерывному затуханию и исчезновению. Причем исчезновение одной конфигурации часто вызывает гибель следующих (темные сплошные линии). Очевидно, так образуется слой УВВ, по которому движется крупная конфигурация от возникшей позднее новой АТВ.

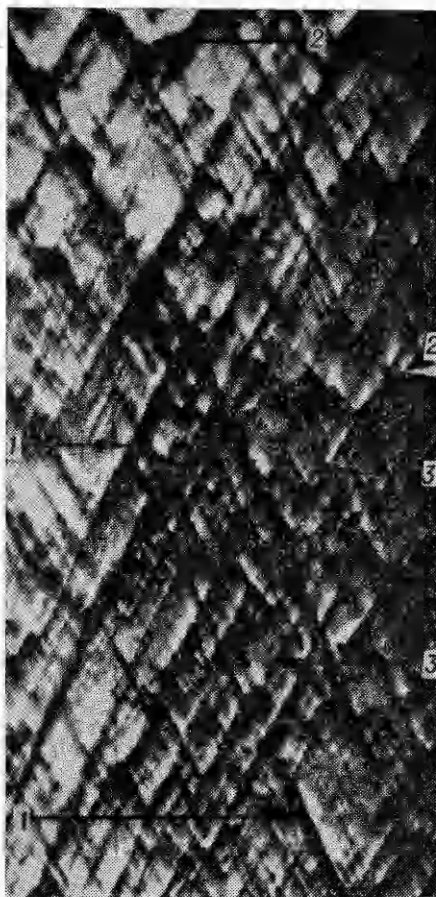
Рис. 2. Развертка свечения детонационного фронта в смеси НМ/ацетон 79,5/20,5.

Почему трехударные конфигурации при столкновении часто не проходят друг через друга, иными словами, почему их столкновение не инициирует детонацию в слое УВВ, возникающего за косой волной встречной конфигурации? По этому поводу можно высказать следующее соображение. В месте столкновения конфигурации резко возрастает давление. В исходном ВВ это вызывает расходящуюся пересжатую детонацию, в которой происходит срыв реакции, и она превращается в прямую волну. В продуктах взрыва косых детонационных волн столкнувшихся конфигураций возникают быстро затухающие ударные волны, которые достигают ударно-сжатых слоев ВВ и подвергают их повторному сжатию. Очевидно, при этом начальная скорость реакции все-таки остается малой. Поэтому из-за большой скорости разгрузки саморазогрева ВВ не происходит, температура падает, и реакция не возникает.

Как уже говорилось, трехударные конфигурации тонкой структуры возникают при давлениях, больших, чем давление, при котором появляются основные конфигурации. Давления эти больше, но они и затухают быстрее. Поэтому конфигурации тонкой структуры менее устойчивы, чем основные. Иногда после появления АТВ, на расходящейся поверхности круга возникают много АТВ и соответствующих им конфигураций более высокого порядка (см. рис. 2, 3). При этом наблюдается полная аналогия с пересжатой расходящейся сферической детонацией [9]. Если сферическая детонация инициируется небольшим зарядом, то при выходе из пересжатия возникающие конфигурации непрерывно исчезают, а количество новых АТВ уменьшается. В некоторый момент АТВ не появляются практически одновременно по всей поверхности расходящейся волны. Такие ситуации, однако, наблюдаются на фронте стационарной детонационной волны сравнительно редко. Чаще конфигурации гибнут поочередно, как при выходе детонационной волны из металлической трубы в объем [9, 10, 25].

Замечания по газовой детонации

Известно, что при детонации конденсированных ВВ профиль давления в волне определяется разлетом продуктов в стороны. Для жидких ВВ этот процесс зависит от свойств стенок трубы, содержащей заряд. Поэтому и критический диаметр детонации заряда одного и того же ЖВВ в трубах, изготовленных из различного материала или из одного материала, но разной толщины стенок, также различается. Этот факт общеизвестен. Но здесь важно другое, а именно то, что для ЖВВ с сильно неустойчивым детонационным фронтом количество пульсаций, неоднородностей на поверхности фронта, зависящее от диаметра заряда, даже вблизи критического диаметра трубы оказывается значительным.



Большое количество пульсаций фронта вблизи критического диаметра детонации объясняется следующим образом. В трубах конечного размера АТВ в УВВ на фронте волны возникают в условиях уменьшающегося давления, а следовательно, и температуры. Ясно, что с уменьшением диаметра трубы разлет продуктов усиливается и скорость падения их температуры возрастает. Это, естественно, приводит к увеличению периода индукции АТВ, к уменьшению количества неоднородностей на фронте и увеличению масштаба его пульсаций. При некотором диаметре заряда, другими словами при некоторой скорости падения температуры в слое УВВ наступает срыв. Срывается само возникновение АТВ, и детонация прекращается.

То, чего не удается достичь из-за относительной слабости стенок труб в случае детонации ЖВВ, легко получается при детонации газовых смесей малого начального давления. В ЖВВ из-за разлета стенок трубы даже вблизи критического диаметра количество неоднородностей еще велико, поэтому в ЖВВ до сих пор не удалось наблюдать спиновой детонации. В газах, когда стенки трубы выдерживают действие давления детонации, спин реализуется легко.

В соответствии с представлениями данной работы, нормальный спин — это один адиабатический взрыв в слое УВВ, который в силу случайных причин приводит к движению поперечной детонационной волны по периметру детонационного фронта вблизи поверхности трубы только в одну сторону. В нормальном спине косая детонационная волна, как уже говорилось, тоже неустойчива. В трубах меньшего диаметра поперечная волна, по-видимому, перестает быть детонационной; отношение шага спирали к диаметру, равное $\sim \pi$ для спина с поперечной детонационной волной, увеличивается, размер косой детонационной волны уменьшается, а ее тонкая структура исчезает. При еще меньшем диаметре трубы реализуется одномерная неустойчивость, так называемый галоп [26—29].

Образование галоп можно представить следующим образом. Это, по- существу, случай, когда диаметр трубы много меньше размера неоднородности; АТВ возникает практически одновременно по всему сечению трубы и приводит к образованию детонации УВВ, которая догоняет фронт инициирующей ударной волны и вызывает в исходной смеси пересжатую детонацию. При выходе этой волны из пересжатия имеет место срыв реакции, что приводит к образованию слоя УВВ, в котором снова возникает АТВ, и т. д., т. е. события повторяются. Когда будет сорвано появление АТВ, галоп прекратится, что будет действительным пределом распространения газовой детонации.

В газовой детонации, когда труба не разрушается, изменение периода индукции АТВ обусловлено главным образом не расширением вещества за фронтом, а его охлаждением за счет теплопроводности в стенки. Удельные тепловые потери в стенку при уменьшении диаметра трубы увеличиваются, поэтому и период индукции АТВ с уменьшением диаметра заряда растет, и при некотором диаметре наступает срыв. Это означает, что скорость охлаждения вещества за фронтом оказывается столь велика, что тепловыделение за счет химической реакции не может компенсировать потери тепла, и поэтому АТВ не возникает.

Заключение

Реальная структура трехударных конфигураций из-за газодинамических причин может быть сложнее, чем структуры, рассмотренные выше (см., например, структуры конфигураций в газовой детонации [7]). Но из изложенного следует, что трехударные конфигурации появляются на детонационном фронте из-за явления срыва и основные элементы их структуры определяются также этим явлением. Выяснение детальной структуры конфигурации не является предметом настоящей работы, да

и из-за низкой разрешающей способности существующих методов сделать это для жидких ВВ в настоящее время затруднительно.

Развитые в настоящей работе соображения о структуре пульсирующего детонационного фронта справедливы, конечно, не только для аррениусовской кинетики разложения ВВ; в равной степени они применимы для любого механизма разложения, например цепного.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. L. Chapman. *Phil. Mag.*, 1899, 47.
2. E. Jouget. *J. Mathem.*, 1904, 6, 5.
3. Я. Б. Зельдович. *ЖЭТФ*, 1940, 10, 542.
4. J. Neuman. OSRD Report, 1942, 549.
5. W. Döring. *Ann. Physic*, 1943, 43.
6. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. *Газодинамика горения*. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
7. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. *Структура фронта детонации в газах*. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
8. Р. И. Солоухин. *Ударные волны и детонация в газах*. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
9. А. Н. Дремин, С. Д. Саврасов, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. *Детонационные волны в конденсированных средах*. М.: Наука, 1970.
10. A. N. Dremin. 12-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburg: Combust. Inst., 1969.
11. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, С. Д. Савров, В. С. Трофимов. *ФГВ*, 1969, 3, 5, 291.
12. В. С. Трофимов, В. А. Веретенников.— В кн.: *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977.
13. Л. А. Франк-Каменецкий. *Диффузия и теплопередача в химической кинетике*. М.: Наука, 1967.
14. А. Г. Мержанов, Е. Г. Зеликман, В. Г. Абрамов. *Докл. АН СССР*, 1968, 180, 3, 639.
15. В. Ю. Клименко, А. Н. Дремин.— В кн.: *Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978.
16. В. Ю. Клименко, А. Н. Дремин. *Докл. АН СССР*, 1979, 249, 4, 840.
17. В. Ю. Клименко, А. Н. Дремин. *Докл. АН СССР*, 1980, 251, 6, 1379.
18. В. Ю. Клименко, А. Н. Дремин.— В кн.: *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1980.
19. A. N. Dremin, V. Yu. Klimentko. *Progress in astronautics and Aeronautics. Gasdynamics of Detonation and Explosions*. Vol. 75, 1981.
20. A. N. Dremin, L. V. Babare. *Shock Waves in Condensed Matter*. New York: Academic Press, 1982.
21. А. А. Воробьев.— В кн.: *Физико-химические процессы в газовой и конденсированной фазах*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1979.
22. А. А. Воробьев, В. С. Трофимов. *ФГВ*, 1982, 18, 6, 74.
23. P. A. Persson, Gunnar Persson. 6-th Symp. (Intern.) on Detonation. San-Diego, 1976.
24. A. W. Campbell, W. L. Davis, J. R. Travis. *Phys. Fluids*, 1961, 4, 3/4, 498.
25. A. N. Dremin, O. K. Rosanov, V. S. Trofimov. *Comb. Flame*, 1963, 7, 2, 153.
26. A. J. Mooradian, W. E. Gordon. *J. Chem. Phys.*, 1951, 19, 3, 1166.
27. N. Manson, G. Brochet, J. Brossard, Y. Pujol. 9-th Symp. (Intern.) on Combustion. New York: Academic Press, 1963.
28. J. P. Saint-Cloud, C. Guerraud, C. Brochet, N. Manson. *Acta Astr.*, 1972, 17, 4/5, 487.
29. A. A. Vasiliev, V. Ya. Ulyanitsky. 8-th Intern. Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactiv Systems. Minsk, 1981.

УДК 662.215.1

НЕКОТОРЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ДЕТОНАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ПОТЕРЯМИ ИМПУЛЬСА

В. В. Митрофанов
(Новосибирск)

Согласно гидродинамической теории детонации [1], для поддержания стационарной детонационной волны должны обеспечиваться иницирование необратимого экзотермического превращения вещества веду-