

СЛОИСТАЯ СТРУКТУРА ЗОНЫ РЕАКЦИИ В ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

В. А. Субботин

Известно, что фронт детонационной волны, распространяющейся в газовой смеси, имеет сложную ячеистую структуру [1—3]. По мере распространения участка переднего фронта внутри элементарной ячейки скорость его движения уменьшается, а расстояние между ударным скачком и зоной реакции увеличивается. Начиная с момента, когда это расстояние становится больше предела разрешения шлирен-метода, на снимках фиксируется неоднородность, соответствующая зоне реакции. На шлирен-снимках детонационной волны, распространяющейся в плоском канале, за передним фронтом часто видна не одна, а несколько неоднородностей. Эти неоднородности имеют вид узких полос, простирающихся на всю или часть длины участка переднего фронта, за которым они возникли, и примерно повторяющих форму этого участка фронта.

Указанное явление описано в работах [4, 5]. Причиной, вызывающей это явление, авторы считают расширение потока за передним фронтом и связанное с ним резкое падение температуры вглубь от переднего фронта. Считается, что позади первичной зоны реакции возникают слои газа с достаточно большой концентрацией активных центров, в которых может произойти вторичное воспламенение. В публикуемой работе на основе экспериментальных данных предлагается иной механизм возникновения указанного явления, которое в дальнейшем именуется как слоистая структура зоны реакции.

Снимки получены при изучении детонации в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$, распространявшейся в плоском канале с поперечным сечением $4,7 \times 96 \text{ мм}^2$. Покадровые шлирен-фотографии и шлирен-развертки получены с помощью приборов ИАБ-451 и СФР. Экспериментальная установка и условия инициирования описаны в работе [6].

На рис. 1 приведены шлирен-снимки детонационной волны с крупной нерегулярной ячеистой структурой ($p_0 = 70 \text{ мм рт. ст.}$). Направление осветительной щели теплеровской установки на рис. 1 и 2 ($p_0 = 56 \text{ мм рт. ст.}$) параллельно прямой, развернутой против часовой стрелки на 25° относительно горизонтали. При получении снимка рис. 1, б нож Фуко вводился на изображение щели с противоположной стороны по сравнению со снимками рис. 1, а и 2. Возрастанию плотности сверху вниз на рис. 1, а и 2 соответствуют светлые места, а на рис. 1, б — более темные. В соответствии с указанной связью между градиентами и освещенностью переднему фронту на рис. 1, б должны соответствовать темные места. В действительности все участки передне-

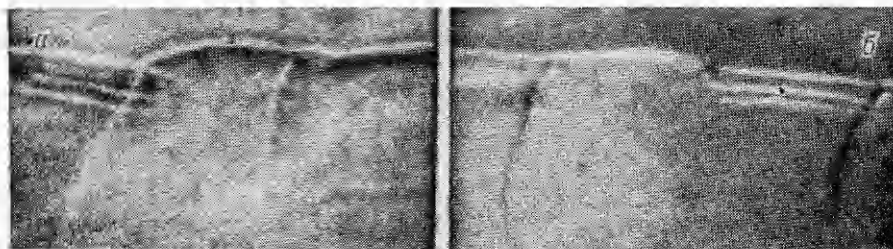


Рис. 1. Детонационные волны с крупной нерегулярной ячеистой структурой.

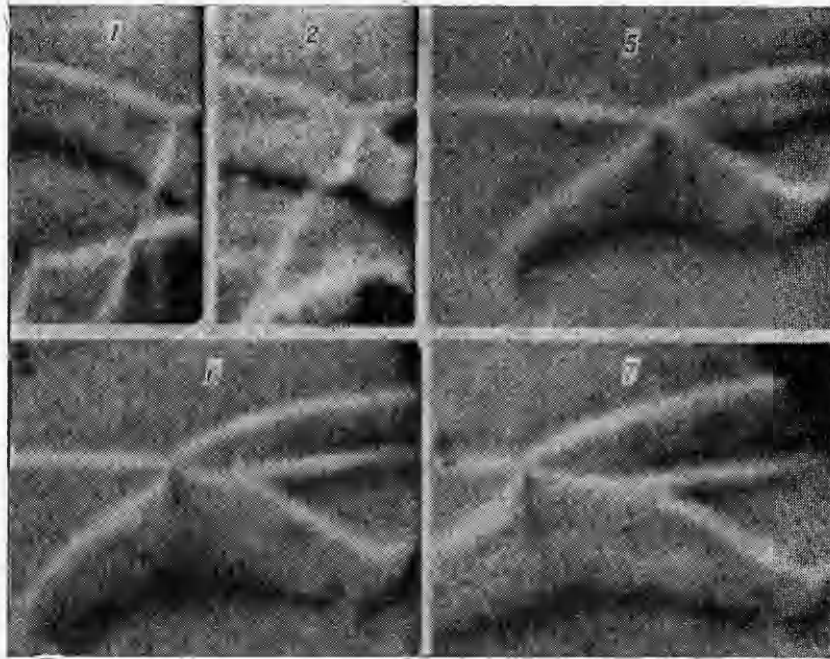


Рис. 2. Отражение поперечной волны от стенки канала; $p_0=56$ мм рт. ст.

го фронта светлые, что, по-видимому, объясняется дифракцией световой волны на ударном скачке.

На рис. 3, *a* приведена расшифровка поля плотности, соответствующего слоистой структуре за участком переднего фронта, расположенным у левого края рис. 1, *a*. Она представляет собою три слоя плотно-го газа (обозначены штриховкой), разделенных слоями менее плотного газа. Слоистая структура, видимая на рис. 1, *б*, состоит из двух слоев плотного газа, разделенных одним слоем менее плотного газа.

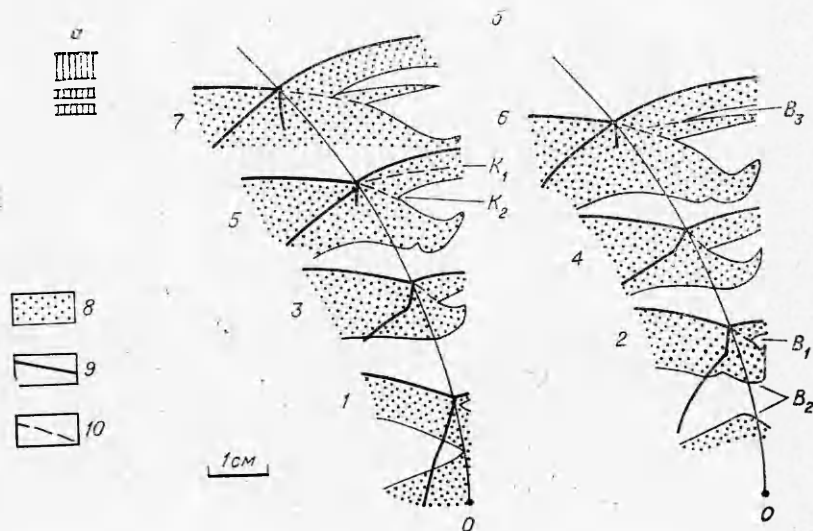


Рис. 3. Расшифровка кадров рис. 1, *б* (*a*), рис. 2 (*б*) (8 — несгоревший газ, 9 — ударные волны, 10 — контактные разрывы).

Рассмотрим процесс возникновения слоистой структуры на примере отражения слабой поперечной волны, существующей на фронте затухающей детонационной волны, от боковой стенки канала. В этом случае возникает сравнительно крупная слоистая структура, что значительно упрощает ее расшифровку.

Некоторые кадры такого процесса приведены на рис. 2, а их расшифровка на рис. 3, б. Кадры расшифровки показаны на траектории движения тройной точки через интервалы времени 7,12 мкс. Кадры с четными номерами вынесены в правую часть рисунка.

Столкновение поперечной волны со стенкой происходит в точке O . После этого момента на переднем фронте у стенки образуется выпуклость, которую в начальные моменты времени можно считать волной Маха, возникающей при нерегулярном отражении ударной волны, подходящей к стенке под некоторым углом. Кроме выпуклости, после отражения возникает система косых ударных скачков в газе, сжатом за падающей волной. Структура этих скачков с течением времени изменяется и на последних кадрах образуется четырехударная структура [6]. Рассматриваемый процесс аналогичен процессу столкновения двух поперечных волн без реакции, описанному в [7].

Через некоторое время после столкновения (см. рис. 2) наблюдаются две области воспламенения B_1 и B_2 . В области B_1 находится газ, прошедший через выпуклость. Область B_2 , расположенная значительно глубже за передним фронтом, представляет собою обратную струю газа, возникшую за счет растекания потока несгоревшего газа вдоль стенки [7]. На рис. 2, 5 в несгоревшем газе видны два контактных разрыва k_1 и k_2 . k_2 возникает сразу после отражения поперечной волны от стенки и есть элемент структуры отраженной поперечной волны. Выше него находится менее плотный газ, прошедший через выпуклость, а ниже — более плотный газ, прошедший через скачки, существующие в газе, сжатом за падающей волной. Контактный разрыв k_1 , имеющий непосредственное отношение к слоистой структуре, впервые становится виден на рис. 2, 5. Причина его возникновения рассматривается ниже, здесь отметим лишь, что выше его находится менее плотный газ.

На рис. 2, б видно, что оба контактных разрыва сливаются в один и точка их слияния сносится вниз по потоку (в системе координат, связанной с точкой излома переднего фронта). Здесь фиксируется еще одна очень важная особенность: на контактном разрыве k_1 появляется полоска сгоревшего газа, которая возникает у стенки и простирается примерно на половину длины выпуклости. На рис. 2, 7 полоска сгоревшего газа распространилась вдоль всего контактного разрыва k_1 , и достигла точки слияния контактных разрывов.

На основе анализа снимков рис. 2 можно сделать следующие выводы:

- 1) слоистая структура, наблюдаемая за передним фронтом, представляет собою чередующиеся слои несгоревшего и сгоревшего газа;
- 2) новый слой сгоревшего газа появляется вдоль контактного разрыва, возникающего в несгоревшем газе впереди существовавшей ранее зоны реакции.

Следует отметить, что второй вывод противоречит механизму, предложенному в [4, 5], согласно которому новая вспышка газа должна происходить позади существовавшей до этого зоны реакции.

Причину возникновения контактного разрыва k_1 , непосредственно по снимкам установить не удастся. Поскольку выше него находится менее плотный газ, то можно предполагать, что причиной его возникновения является ударная волна, догоняющая передний фронт. Контактный разрыв k_1 , видимый на рис. 2, 5, вблизи стенки находится на некотором расстоянии δx_1 от переднего фронта. Отсюда можно заклю-

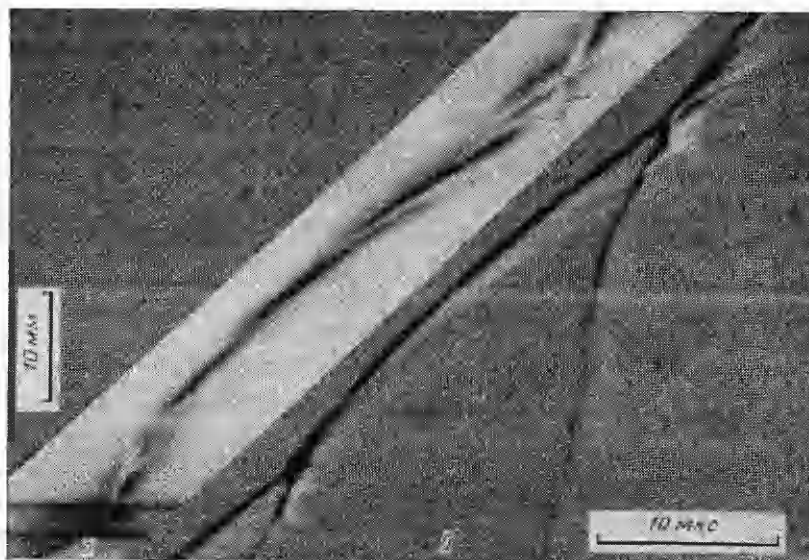


Рис. 4. Шлирен-развертки детонационных волн с регулярной ячеистой структурой (негативы); $p_0=110$ мм рт. ст. (а), $p_0=100$ мм рт. ст. (б).

чить, что ударная волна догнала передний фронт вначале у стенки, а затем распространилась вдоль всей выпуклости. Расстояние δx_2 , пройденное передним фронтом вдоль стенки с момента выхода на него ударной волны, можно определить из соотношения $\delta x_2 = \sigma \delta x_1$, где σ — относительное сжатие газа за передним фронтом, определяемое по скорости движения переднего фронта вдоль стенки. Из приведенного соотношения было определено, что ударная волна догнала передний фронт примерно на кадре 4.

Источником этой ударной волны может быть одна из двух экспериментально наблюдаемых вспышек B_1 и B_2 , поскольку возникновение и развитие вспышки должно вызывать волну сжатия, расходящуюся во все стороны. Расстояние от переднего фронта, на котором находится вспышка B_2 в момент ее появления, примерно на порядок больше соответствующего расстояния для вспышки B_1 . Время, за которое слабое возмущение от вспышки B_1 догонит передний фронт, можно определить, если считать, что параметры потока на некотором расстоянии за выпуклостью такие же, как и на самом фронте. Определенное таким образом время оказалось примерно в 5 раз меньше времени между моментом появления вспышки B_1 (кадр 1) и моментом выхода ударной волны на передний фронт (кадр 4). Отсюда можно заключить, что ударная волна, вызывающая появление контактного разрыва k_1 , генерируется не вспышкой B_1 , а вспышкой B_2 .

Рассмотрим процесс возникновения слоистой структуры при самоподдерживающейся детонации с регулярной ячеистой структурой. На рис. 4 приведены шлирен-развертки такого процесса, сделанные вдоль оси симметрии ячейки. Осветительная щель была перпендикулярна образующей канала и ее ширина равнялась 0,25 и 1,0 мм для разверток рис. 4, а, б соответственно. При получении разверток нож Фуко вводился на изображение щели с противоположных сторон. Различие в настройке теплеровской установки привело к тому, что на рис. 4, б лучше видна траектория движения переднего фронта, а на рис. 4, а — траектории движения неоднородностей, возникающих за передним фронтом.

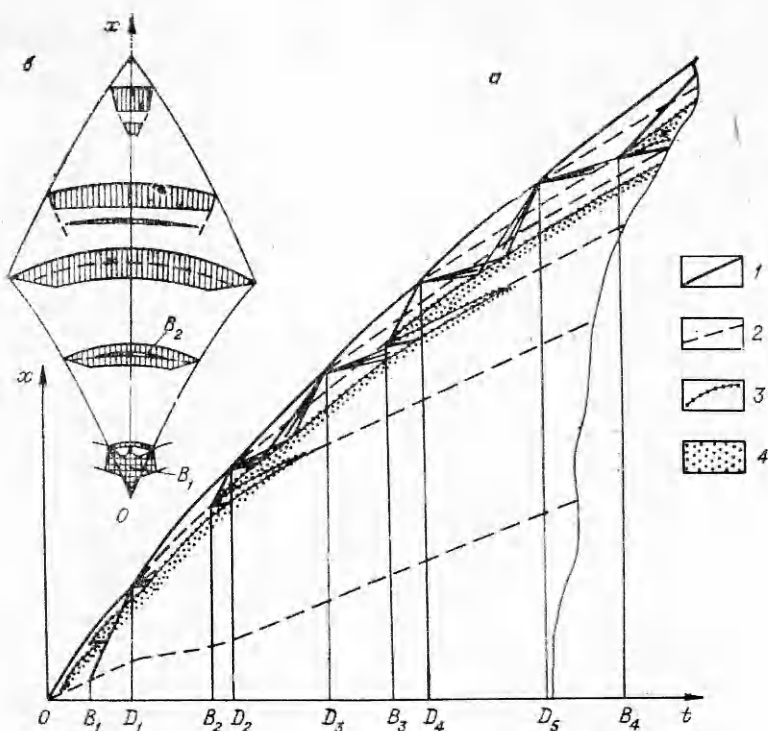


Рис. 5. Расшифровка процесса, приведенного на рис. 4 (для одной ячейки).

1 — ударные волны; 2 — контактные разрывы; 3 — граница между сгоревшими и несгоревшими газами; 4 — зона интенсивной химической реакции.

Основные явления, объясняющие образование слоистой структуры, показаны на t, x -диаграмме, приведенной на рис. 5, *a*, где t — время от момента столкновения и x — расстояние от точки столкновения O вдоль оси симметрии ячейки (ось Ox рис. 5, *b*). Следует отметить, что основные процессы, приводящие к возникновению слоистой структуры, сосредоточены в узкой зоне несгоревшего газа, прилегающего к переднему фронту, и на развертках не фиксируются. Отправными моментами при построении диаграммы были следующие экспериментально наблюдаемые явления:

1) изломы траектории движения переднего фронта $D_1—D_5$, которые видны при рассмотрении траектории переднего фронта, приведенной на рис. 4, *b*, при условии, что луч зрения скользит вдоль поверхности снимка;

2) траектории движения неоднородностей, существующих за передним фронтом; эти траектории лучше видны на рис. 4, *a*. При построении диаграммы считалось, что изломы траектории движения переднего фронта вызываются ударными волнами (или волнами сжатия), догоняющими передний фронт.

На рис. 5, *a* область, соответствующая несгоревшему за передним фронтом газу, находится между траекторией переднего фронта и кривой 3. Траектории движения неоднородностей 4, хорошо видимые на рис. 4, *a*, по всей вероятности, соответствуют зонам интенсивной реакции. Через некоторое время после столкновения происходит воспламенение несгоревшего газа в глубине за образующейся выпуклостью (точка B_1). Волна сжатия, создаваемая этим воспламенением, догоняет пе-

редний фронт в точке D_1 . После этого передний фронт начинает двигаться быстрее, а в несгоревшем газе возникают контактный разрыв и волна разрежения, движущаяся вглубь от переднего фронта. В лабораторной системе координат фронт волны разрежения движется в сторону возрастающих значений x . Волна разрежения, отразившись от зоны реакции, превращается в волну сжатия, которая догоняет передний фронт. Чтобы не усложнять чертеж, эта волна сжатия и излом траектории переднего фронта, вызываемый ею, на диаграмме не показаны, хотя на рис. 4, б этот излом фиксируется. Поскольку выше контактного разрыва, идущего от точки D_1 , находится более нагретый газ, следующая вспышка B_2 происходит в слое этого газа, расположенного с верхней стороны контактного разрыва. Эта вспышка создает ударные волны, движущиеся относительно газа в противоположные стороны. Одна из этих волн догоняет передний фронт в точке D_2 , после чего повторяется процесс, имевший место у точки D_1 . Волна разрежения, идущая от точки D_2 , отражается от зоны реакции волной сжатия, которая вызывает излом траектории переднего фронта в точке D_3 . Времена индукции для вспышек B_2 , B_3 и B_4 примерно равны $1/8$, $1/4$ и $1/3$ времени прохождения детонации вдоль ячейки соответственно.

Из диаграммы видно, что слоистая структура зоны реакции, состоящая из двух слоев несгоревшего газа, разделенных одним слоем сгоревшего газа, возникает трижды по мере продвижения переднего фронта внутри ячейки. Хотя слоистая структура с большим числом слоев на диаграмме не показана, для объяснения причин ее возникновения не требуется привлечения какого-либо качественно нового механизма.

Некоторые кадры двумерной картины процесса, рассмотренного на рис. 5, а, приведены на схеме рис. 5, б, масштаб которого уменьшен в два раза по сравнению с рис. 5, а. Нижнее положение фронта рис. 5, б соответствует моменту B_1 на диаграмме процесса рис. 5, а. В этот момент в газе, прошедшем через выпуклость на переднем фронте, уже идет реакция, а несколько глубже за передним фронтом существует область несгоревшего газа, в которой возникает вспышка B_1 . В этой области находится газ, прошедший вначале через передние фронты соседних ячеек, а затем через ударные скачки, распространяющиеся по газу, сжатому за этими фронтами. Развиваясь, вспышка B_1 охватывает всю область несгоревшего газа и создает ударную волну, догоняющую передний фронт.

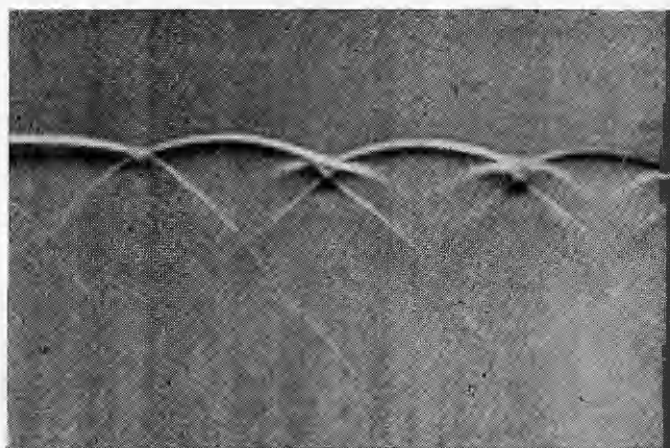


Рис. 6. Детонационная волна с регулярной структурой, $p_0 = 90$ мм рт. ст.

Следующее положение фронта соответствует моменту времени B_2 , когда на контактном разрыве в несгоревшем газе (на схеме рис. 5, б этот газ обозначен вертикальной штриховкой) появляется полоска сгоревшего газа B_2 . Третье, среднее положение фронта соответствует моменту времени перед появлением вспышки B_3 . Вспышка должна возникнуть вдоль контактного разрыва, показанного штриховой линией.

Кадр процесса, примерно соответствующий данному моменту времени, приведен на рис. 6. Этот снимок получен «методом компенсации» через щель, расположенную перпендикулярно образующей канала. Скорость движения пленки, отнесенная к плоскости канала, равнялась средней скорости детонации (1720 м/с) и по направлению совпадала с направлением распространения детонации. На этом снимке видно, что слоистая структура возникла за выпуклостью, расположенной у левого края снимка. На остальных участках фронта вспышка на контактном разрыве должна произойти несколько позднее.

Контактный разрыв за этими участками переднего фронта не фиксируется из-за недостаточной разрешающей способности шпирен-снимков. Данный снимок, а также фото, приведенные в [6], позволяют заключить, что передний фронт в данный момент имеет форму, которая достаточно точно аппроксимируется дугой окружности. Радиус аппроксимирующей дуги оказывается в $1,3 \pm 0,1$ раза больше расстояния, пройденного передним фронтом от точки столкновения вдоль оси Ox . Отметим, что и в других положениях передний фронт также имеет форму дуги окружности с радиусом, большим расстояния Ox , пройденного передним фронтом. Однако в этих случаях величина радиуса измеряется с меньшей точностью.

Четвертое снизу положение фронта соответствует моменту времени D_4 и D_5 . В этом положении в результате возникновения вспышки B_3 образовался отделившийся от переднего фронта слой несгоревшего газа, который постепенно догорает в глубине за фронтом. Последнее положение фронта соответствует моменту времени после возникновения вспышки B_4 .

Следует отметить, что описанный выше механизм возникновения слоистой структуры в основных чертах сходен с предложенным в [8] механизмом неустойчивости, возникающей при движении затупленных тел с большой скоростью в горючей смеси газов.

Автор благодарит В. В. Митрофанова за полезные обсуждения и внимание к работе.

*Институт гидродинамики
СО АН СССР, Новосибирск*

*Поступила в редакцию
11/V 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. J. H. Lee, R. I. Soloukhin, A. K. Oppenheim. *Astronautica Acta*, 1969, 14, 5.
3. R. A. Strehlow. *Astronautica Acta*, 1969, 14, 5.
4. D. H. Edwards, G. Hooper, R. J. Meddins. *Astronautica Acta*, 1972, 17, 4—5.
5. D. H. Edwards, R. J. Meddins. *Combustion and Flame*, 1971, 16, 3.
6. В. А. Субботин. ФГВ, 1975, 11, 1.
7. В. А. Субботин. ФГВ, 1975, 11, 3.
8. R. L. Alpert, T. Y. Toong. *Astronautica Acta*, 1972, 17, 4—5.