

g_0 , ккал/моль	R_0 , см	Z , см	D/D_0	D/D_0 сред- нее
100	10^{-4}	0,65	1,01	1,01
	$5 \cdot 10^{-4}$	9,00	1,01	
	10^{-3}	25,00	1,01	
150	10^{-4}	0,50	1,25	1,25
	$5 \cdot 10^{-4}$	6,30	1,26	
	10^{-3}	20,00	1,25	
200	10^{-4}	0,40	1,42	1,43
	$5 \cdot 10^{-4}$	5,50	1,43	
	10^{-3}	15,00	1,43	

скорости детонации за счет наполнителя D/D_0 от теплового эффекта вторичной химической реакции g_0 и начального радиуса частиц R_0 . Представленные в таблице результаты получены для твердых частиц ($L=75$ ккал/моль).

Таким образом, сравнивая полученные результаты с приведенными в [1, 2], можно сделать следующие выводы.

1. Волна сжатия, возникающая за детонационным фронтом на начальном этапе распространения детонации по смеси газообразного ВВ с химически активным наполнителем, сохраняется за ним и в стационарном режиме.

2. Основное усиление параметров фронта детонационной волны зоной вторичных химических реакций происходит на участке интенсивного разгона, расположенного вблизи места ее инициирования.

3. Величина участка интенсивного разгона зависит от дисперсности частиц наполнителя и увеличивается с ростом последней.

4. Условия распространения рассматриваемой и классической детонационных волн в стационарном режиме полностью совпадают.

В заключение автор выражает благодарность С. В. Валландеру и А. А. Грибу (Ленинградский государственный университет), по инициативе которых была решена эта задача.

Поступила в редакцию
30/IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. А. Антонов, А. М. Гладиллин. МЖГ, 1972, 5.
2. А. М. Гладиллин. ФГВ, 1974, 10, 1.
3. T. H. Pierce, I. A. Nicholls. Astronautica Acta, 1972, 17, 4/5.
4. Г. М. Бам-Зелинкович. В сб. Теоретическая гидромеханика, № 4, 1949.
5. Р. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М., ИЛ, 1950.

УДК 534.222.2

СТОЛКНОВЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗАХ

В. А. Субботин

(Новосибирск)

Известно, что детонационный фронт в газах является неплоским и покрыт возмущениями — поперечными волнами [1—4]. При распространении детонации происходят столкновения поперечных волн, движущихся во встречных направлениях. Вывод о важной роли столкновений в механизме распространения детонации, по-видимому, впервые был

получен в работе [5] с помощью расчета столкновений косых ударных скачков. Однако реально существующие структуры поперечных волн [2] отличаются от схемы с изломом, использовавшейся в указанной работе.

В предлагаемой работе приводятся результаты экспериментов по изучению столкновений поперечных волн. Исследования проводились методом покадрового шпирен-фотографирования детонационных волн, распространяющихся в плоском $4,7 \times 96$ мм² канале. Экспериментальная установка и условия инициирования те же, что и в работе [6].

В основном рассматриваются явления, возникающие при столкновениях поперечных волн, существующих при затухающей детонации в смесях $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ и $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\%$ воздуха. При наблюдавшейся в условиях эксперимента самоподдерживающейся детонации размер области, в которой после столкновения происходит самовоспламенение смеси, составляет несколько миллиметров. В этом случае детали взаимодействия обычно не удается установить из-за недостаточной разрешающей способности применявшегося метода и из-за влияния трехмерности процесса.

На рис. 1, а показаны положения фронта (через 3,56 мкс) и траектории движения тройных точек при столкновении поперечных волн в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\%$ воздуха ($p_0 = 120$ мм рт. ст., $D_1 = 1650$ м/с). Пронумерованным положениям фронтов рис. 1, а соответствуют кадры столкновения на рис. 1, б. На любом снимке данной статьи воспроизводится не полный кадр, а лишь тот его участок, на котором происходит столкновение. Снимки позволяют выявить интересную особенность столкновения — образование струйных течений газа (см. рис. 1, б (кадр 4) 5 и 6).

Теплограммы получены методом ножа и щели, направление щели на снимках параллельно прямой, повернутой по часовой стрелке на 65° относительно вертикали. Такая ориентация щели позволяет фиксировать как вертикальные, так и горизонтальные градиенты. Левые стороны в обеих струях темнее, а правые светлее среднего фона. Это говорит о том, что плотность газа в обеих струях либо выше, либо ниже плотности окружающего газа. Связь между градиентами и изменением освещенности в местах расположения этих градиентов задается введением ножа с одной из сторон щели и легко контролируется по снимкам с помощью структур, на которых изменение плотности известно: передних ударных фронтов, зон горения, шлейфов и т. д. На рис. 1 возрастанию плотности сверху вниз и слева направо соответствуют темные места. Поэтому газ в струях более плотный, чем окружающий. Анализ приведенного,

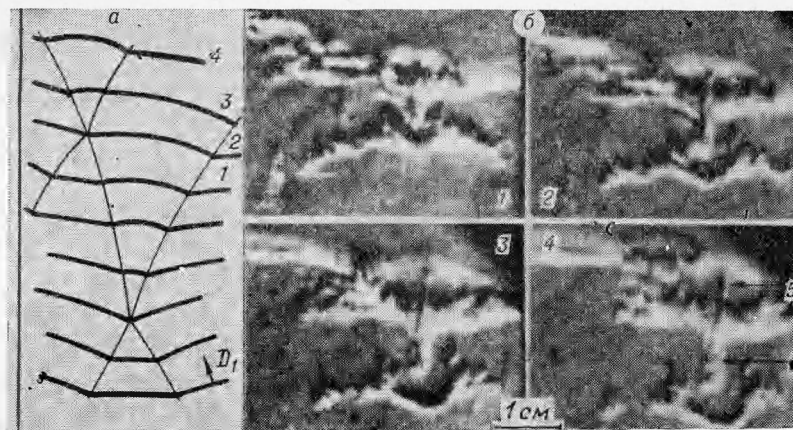


Рис. 1.

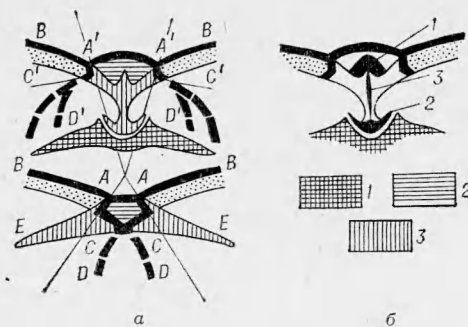


Рис. 2.

любой структуры. Этой особенностью является образование струй. С помощью рис. 2, а рассмотрим основные процессы, происходящие при столкновении. На схеме поперечные волны показаны перед столкновением и после него (началом столкновения считается момент столкновения тройных точек, движущихся по переднему фронту). Сталкивающиеся поперечные волны движутся по переднему фронту AA' и состоят из изломов переднего фронта AB и поперечных фронтов AC , распространяющихся по несгоревшему газу.

К фронту AC снизу примыкает волна сжатия (шлейф) CD , распространяющаяся по сгоревшему газу. Фронт AC может иметь различную структуру [6]. Схема соответствует случаю, когда поперечные волны имеют структуру типа II. Фронт AC состоит из двух пересекающихся регулярно косых скачков (отраженные волны и контактный разрыв, возникающие при таком взаимодействии, на схеме не показаны). Один из скачков идет от тройной точки на переднем фронте, а второй из сгоревшего газа (от шлейфа CD). Смесь за фронтами AC не самовоспламеняется и области ACE являются «хвостами» несгоревшего газа.

Газ, сжатый за существовавшими до столкновения фронтами AC , после столкновения оказывается в треугольной области 1. Взаимодействие фронтов AC обычно не приводит к самовоспламенению этого газа и позднее он становится «островком». После столкновения начинается взаимодействие потоков газа, сжатого за изломами AB . В результате на переднем фронте возникает новая выпуклость $A'A'$ (см. рис. 2, а, область 2). В области 3 (см. рис. 2, а) показан газ, прошедший через возникшие после столкновения фронты $A'C'$. Область газа, прошедшего через фронты $A'C'$, отделена от указанных ранее областей контактными разрывами, которые имеют характерную особенность: вблизи оси симметрии столкновения они искривлены так, что газ, прошедший через фронты $A'C'$, внедряется в соседние области. Эту особенность течения можно объяснить следующим образом: газ, прошедший через фронты $A'C'$, в лабораторной системе координат имеет составляющие скорости, направленные к оси симметрии столкновения. В результате этого потоки газа сталкиваются на оси симметрии и растекаются вдоль нее в противоположные стороны. Часть потока поворачивает к переднему фронту, часть в противоположную — к вершине треугольной области. Механизм этого явления сходен с кумулятивным [7] и в терминах кумуляции следовало бы струю, направленную к переднему фронту, называть кумулятивной, а обратную — «пестом». На наш взгляд, применение этих терминов в данном случае не оправдано, поэтому будем называть их прямой и обратной струями. Обратная струя направлена к вершине треугольной области. Воздействие струи приводит к тому, что в вершине возникает выемка (кратер) еще до того, как произойдет самовоспламенение смеси. После самовоспламенения треугольная область становится «островком», причем характерной особенностью всех островков является выемка при их вершине [6].

а также других столкновений позволяет сделать вывод, что струи 5 и 6 состоят из несгоревшего газа и граничат со сгоревшим.

Полная картина взаимодействия сталкивающихся поперечных волн достаточно сложна и включает в себя взаимодействие различных элементов их структуры. Однако можно выделить основную особенность столкновения, которая проявляется при столкновении поперечных волн

С учетом указанных особенностей течения можно объяснить расположение локальных объемов несгоревшего газа, в которых после столкновения начинает самовоспламеняться смесь. Самовоспламенение начинается (рис. 2, б):

1 — в глубине за волной $A'A'$, где находится газ, прошедший через эту волну в момент ее возникновения;

2 — вблизи точки торможения обратной струи в месте ее взаимодействия с вершиной треугольной области, так как в точке торможения температура возрастает;

3 — вдоль оси симметрии столкновения в газе, прошедшем через фронты $A'C'$, где находится газ, ранее всего прошедший через указанные фронты.

При столкновении, показанном на рис. 1, самовоспламенение произошло в объемах 1 и 2 (см. рис. 2, б), а внутри струй (3) смесь не самовоспламенилась. Поэтому на границах струй существуют большие градиенты плотности, которые и дают возможность наблюдать эти струи. После самовоспламенения газа в месте взаимодействия обратной струи с вершиной треугольной области последняя становится островком и догорает за счет распространения пламени с поверхности. Иногда наблюдается ускоренное сгорание островка за счет самовоспламенения, начинающегося на его оси симметрии. Причиной этого может быть воздействие ударной волны, возникающей при самовоспламенении газа вблизи вершины островка. Кроме этого, около оси островка находится газ, наиболее сильно нагретый при столкновении фронтов AC .

На рис. 3 показано столкновение поперечных волн в смеси $2H_2 + O_2 + 3Ar$ ($p_0 = 55$ мм рт. ст., $D_1 = 1280$, $D_2 = 1100$ м/с). В этом столкновении нормальная скорость движения излома AB меньше, а толщина слоя несгоревшего газа за ним больше, чем при столкновении, показанном на рис. 1. Поэтому образование струй и связанное с ним искривление контактных разрывов проявляется значительно слабее. Самовоспла-

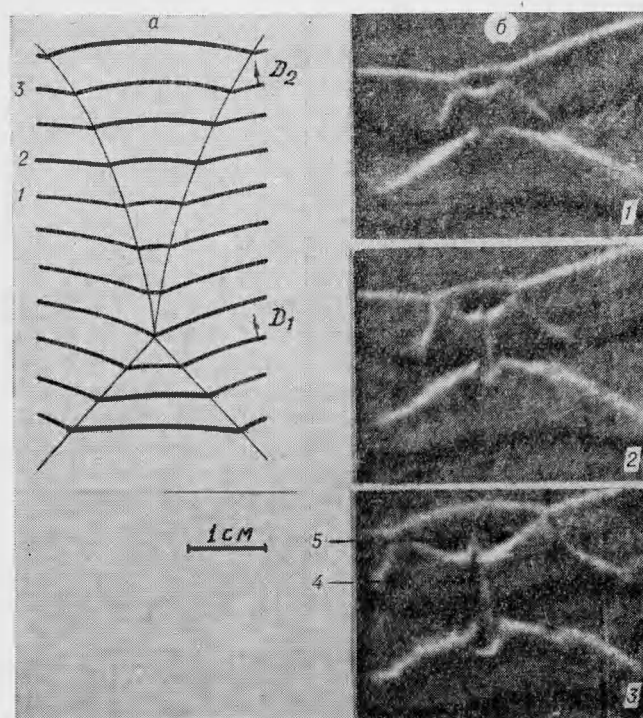


Рис. 3.



Рис. 4.

менение смеси происходит во всех областях, указанных на рис. 2, б. Так, на рис. 3, б (кадр 3) область 4 — это сгоревший газ в глубине за волной $A'A'$, а 5 — сгоревший вблизи оси симметрии столкновения газ, прошедший через фронты $A'C'$.

На приведенных photographиях (см. рис. 3, 4, 5) возрастанию плотности сверху вниз и слева направо соответствуют более светлые места. Это объясняется тем, что при получении снимков нож теплеровской установки вводился на изображение щели с противоположной стороны по сравнению с фото рис. 1. Поэтому на рис. 3 темные линии на левой границе 4 и на верхней грани-

це области 5 указывают на наличие в этих областях менее плотного газа. Начало самовоспламенения за волной $A'A'$ фиксируется недостаточно точно, так как сразу после столкновения за этой волной наблюдается спад плотности, направленный вглубь от переднего фронта, на фоне которого трудно установить момент появления темной линии на границе между сгоревшим и несгоревшим газами. Но в более поздние моменты времени эта граница видна достаточно четко.

На снимках струи часто не наблюдаются, так как после самовоспламенения они перестают быть видны. Однако выемка в островке всегда хорошо видна. На рис. 4 показано столкновение в момент, когда обратная струя, наблюдавшаяся на более ранних кадрах, полностью сгорела, а прямая еще видна.

Выше рассматривались симметричные столкновения. При столкновении поперечных волн разной интенсивности прямая струя отклонена от вертикали в направлении движения более сильной волны. Мерой интенсивности волны может служить угол в точке столкновения между касательными к траектории движения тройной точки и к переднему фронту AA . Так как нормальные к фронту AA составляющие скорости движения тройной точки в момент столкновения равны, а касательная составляющая больше у более сильной волны, то указанный угол у более сильной волны меньше. На рис. 5 приведены кадры несимметричных столкновений (a — $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\%$ воздуха, $p_0 = 80$ мм рт. ст., b — $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$, $p_0 = 55$ мм рт. ст.). Перед столкновением более сильная волна двигалась справа налево.

Как уже указывалось, приведенные снимки получены при затухающей детонации. При самоподдерживающейся детонации также происходит образование струй. Доказательством этого служит выемка при вершинах островков в тех смесях, в которых и при самоподдерживающейся детонации образуются островки несгоревшего газа. В смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$ островки несгоревшего газа при самоподдерживающейся

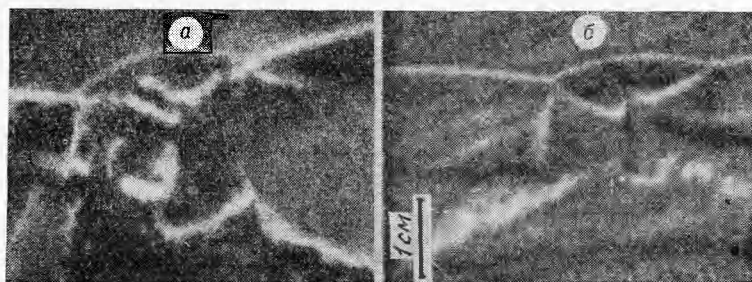


Рис. 5.

детонации не образуются [6]. В этом случае в островках находится газ, сгоревший до столкновения за поперечными фронтами АС. Островки сгоревшего газа обычно не видны из-за малых градиентов плотности на их границе. Но иногда и при самоподдерживающейся детонации в данной смеси удается зафиксировать как прямую, так и обратную струи.

Следует отметить, что возникновение струй связано только с газодинамическими особенностями течения и наблюдается также в нереагирующих газах. Так, в работе [8] наблюдалось искривление контактного разрыва и сворачивание его в вихрь в опытах по исследованию отражения сильных ударных волн от клина.

Таким образом, экспериментально установлено, что при симметричном столкновении поперечных волн возникают струи, направленные вдоль оси симметрии столкновения: одна из них (прямая) направлена к переднему фронту, вторая (обратная) в противоположную сторону. При несимметричном столкновении прямая струя отклонена от вертикали в направлении движения более сильной поперечной волны.

Указанная особенность течения проявляется при столкновении поперечных волн любой структуры.

Экспериментально определено расположение локальных объемов несгоревшего газа, в которых после столкновения начинается самовоспламенение смеси.

*Поступила в редакцию
10/X 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин, П. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчий. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во АН СССР, 1963.
3. R. A. Strehlow, C. D. Engel. AIAA 1969, 7, 2—3.
4. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз, 1963.
5. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1960, 1.
6. В. А. Субботин. ФГВ, 1975, 11, 1.
7. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, XII, 4.
8. Л. В. Баженова, Т. Г. Гвоздева и др. Ударные волны в реальных газах. М., «Наука», 1968.

УДК 532.593

К РАСЧЕТУ УДАРНЫХ АДИАБАТ В АЗОТЕ

В. П. Замураев, Г. А. Ковальская, Р. И. Солоухин

(Новосибирск)

Расчету ударных адиабат в азоте посвящен ряд публикаций [1—9], причем наиболее полные табличные данные представлены в [2—4, 7, 8]. Диапазон температур и давлений за прямой ударной волной, охватываемый этими расчетами, показан на диаграмме рис. 1. Сплошная кривая ограничивает область параметров за падающей ударной волной, а штриховая — за отраженной. Данная работа предпринята с целью расширить этот диапазон в сторону более высоких температур, где расчет существенно усложняется рядом дополнительных физических эффектов. Некоторые данные этого диапазона, полученные для падающей ударной волны, представлены графически в [6], однако сильно упрощенные