

О ПРИРОДЕ ОДНОГО ИЗ ВИДОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

М. Е. Топчиян, В. Ю. Ульяницкий

Следовые отпечатки траектории головы спиновой детонации в круглой трубе, полученные разными авторами, по своему характеру можно отнести к трем типам. На рис. 1 приведены фотографии таких следов. К первому типу (рис. 1, а) отнесем наиболее четкие и устойчивые траектории, обнаруживающиеся, например, на смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$, при этом фиксируются следы от тройных точек как в области сопряжения поперечной волны с передним фронтом (линии А и В), так и при взаимодействии контактного разрыва между сгоревшим и несгоревшим газом (линия С). След практически прямолинейный с отклонениями угла траектории от среднего значения не более чем на $0,5^\circ$. Такого типа отпечатки наблюдали, в частности, авторы работ [1, 2].

Типичный отпечаток второго типа (смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2$) обнаруживает изломы траектории, повторяющиеся примерно через $0,65$ шага спирали. Резкие отклонения угла траектории, достигающие 7° , сосредоточены примерно на трети периода вращения. В остальной части величина угла наклона (φ) мало отличается от среднего значения, которое для каждой смеси от опыта к опыту остается одинаковым с точностью до ошибки измерения (рис. 1, б). Средний угол определяется по формуле $\varphi_{\text{ср}} = \arcsig(\pi d/H)$, где d — диаметр трубки, H — средний шаг спирали в каждом опыте. Разброс значений определенного таким образом $\varphi_{\text{ср}}$ для каждой смеси составлял не более $0,5^\circ$.

К третьему типу относятся относительно недавно полученные В. В. Митрофановым и В. И. Манжалеем отпечатки в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ (рис. 1, в), у которых передняя линия, как и в $2\text{CO} + \text{O}_2$, двойная, однако весь ленточный след покрыт сеткой вторичных поперечных возмущений.

Проведенная здесь классификация относится к наиболее характерным случаям, реально при изменении условий эксперимента можно наблюдать любые промежуточные комбинации. Наиболее подробные экспериментальные данные о рассматриваемых явлениях можно найти в работах [3—5]. Следовые отпечатки показывают, что в данном случае, по-видимому, имеют место два независимых явления, резко отличающиеся как по временному масштабу, так и по характеру воздействия их на все течение в целом.

Природа одного из этих явлений, приводящая к мелкомасштабным изменениям в структуре течения, как уже справедливо указывалось в [3—5], связана с неустойчивостью зоны реакции в поперечной волне и изломе переднего фронта (косой волне). Наиболее характерным проявлением этого вида неустойчивости являются отпечатки третьего типа. В отношении природы крупномасштабной неустойчивости (отпечатки 2-го типа) в настоящее время единой точки зрения нет. В работе [5] предполагается, что это явление обязано своим происхождением взаимодействию головы спина со слабыми волнами, имеющими противоположное направление вращения; этот вывод следовал из рассмотрения отпечатков в условиях, постепенно приближающихся к пределу, когда действительно наблюдаются такие волны. Однако опыты, проведенные нами в предельных условиях, показывают, что и в этом случае, когда нет никаких следов встречных волн, характер изломов сохраняется.

В работе [4] искривление следа объясняется появлением «воспламенения вспышечного характера». Физическая природа этих вспышек не

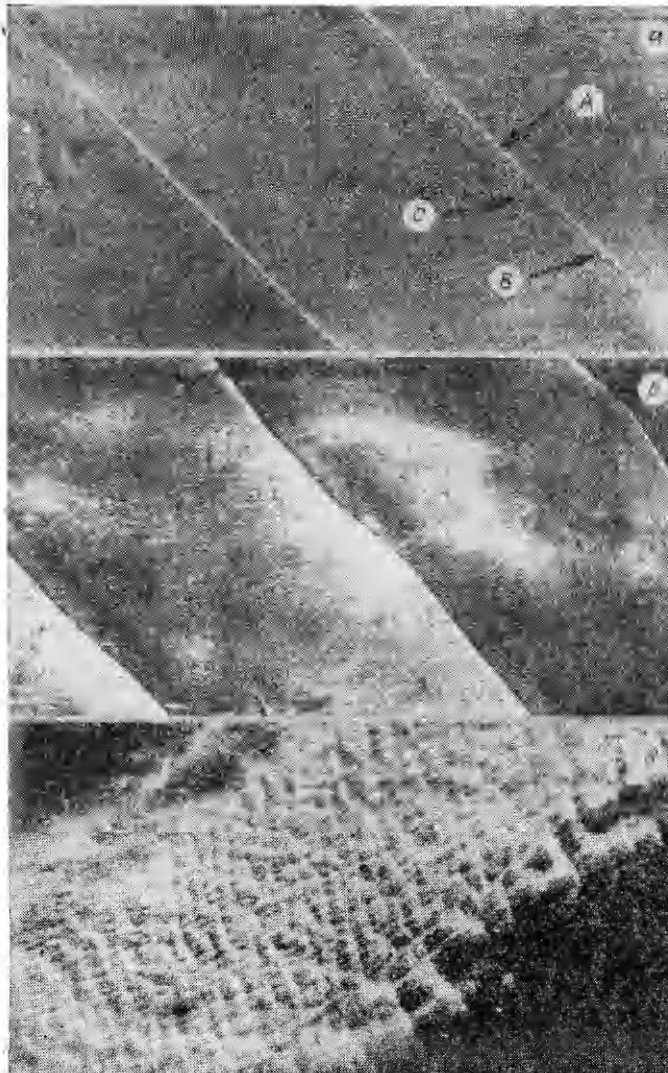


Рис. 1.

рассматривается, указывается, что явление связано с какими-то процессами вблизи «носика».

С целью выяснения природы этих возмущений в настоящей работе были проведены комплексные исследования явления. Эксперименты заключались в получении фоторазверток и тепловых снимков методом полной компенсации для определения угла наклона волны AA_2 , необходимого для расчетов течения, получение следовых отпечатков с целью установления полной скорости движения потока и ее направления в системе координат, связанной с головой спина.

Методика этих экспериментов достаточно хорошо описана в [2, 3]. По данным эксперимента (углу наклона AA_2 , полной скорости потока) производились расчеты тройных конфигураций, ударных и детонационных поляр и центрированных волн разрежения в точке D . За изломом переднего фронта и в поперечной волне состав считался равновесным, в остальных случаях — замороженным; расчеты велись с использованием таблиц (с учетом изменения отношения удельных теплоемкостей).

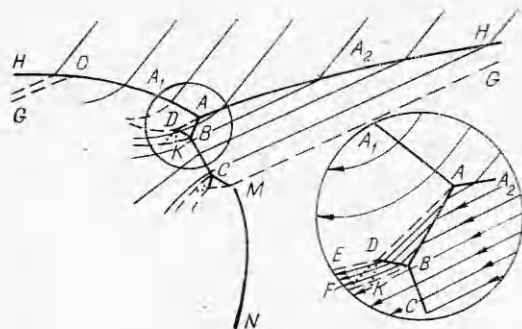


Рис. 2.

Эксперименты проводились в трубе диаметром 21 мм. Расстояние от точки инициирования навеской азид свинца до секции, в которой производились измерения, — 2,5 м. Исследовались смеси $2\text{CO} + \text{O}_2 + 5\% \text{H}_2$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$, $2\text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{O}_2 + 25\text{Ag}$.

Для обеспечения предельного режима распространения начальное давление смесей выбиралось так, чтобы устойчивый одноголовый спин наблюдался примерно в 50% экспериментов, в остальных случаях детонация либо не возбуждалась, либо затухала, эти давления для исследовавшихся оказались равными 80, 48, 40 и 45 мм рт. ст. соответственно. Для составления смесей (по давлению) использовались газы из технических баллонов.

Следовые отпечатки, полученные для первых двух смесей, приведены на рис. 1, а и б соответственно для третьей и четвертой смесей, они имели такой же характер, как для $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, однако в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$ амплитуда отклонений от среднего угла заметно меньше, чем на рис. 1, б.

Рассмотрение отпечатков показывает, что излом траектории действительно является следствием каких-то процессов в зоне, соответствующей «носику» поперечной волны. В точке излома происходит резкое расширение пары линий, отвечающих траекториям тройных точек А и В (рис. 2). От этого места в зону, занимаемую поперечной волной, тянется трек — след движения возмущения. Линия С выражена слабо и представлена размытой полосой.

Образование «носика» (область A_1AD на рис. 2), фиксируемого на картине самосвечения и теплорограммах спиновой детонации, обусловлено поворотом контактного разрыва ADE в точке D , вызванным разлетом продуктов детонации поперечной волны.

На рис. 3 приведены полученные в результате точного машинного счета детонационная и ударная поляры для смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$, здесь S — ударная поляра, D — детонационная поляра, $Ж$ — точка Жуге. Ветвь D — поляры выше точки Жуге описывает сильные, а ветвь ниже точки $Ж$ — слабые косые пересжатые детонационные волны. Линия MM соответствует углу поворота потока, омывающего контактный разрыв ADE , по сравнению с первоначальным направлением. Как видно из этих поляр, ни ударная, ни детонационная волна не могут повернуть поток на необходимый угол 52° . Следовательно, в этом случае должно возникать течение с уходом детонационной волны от точки поворота вверх по потоку. Здесь получаем количественное подтверждение качественного результата, полученного ранее Б. В. Войцеховским [6].

В смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ картина движения газа в области точки А несколько иная. Фотографии самосвечения (рис. 4, а) не обнаруживают столь

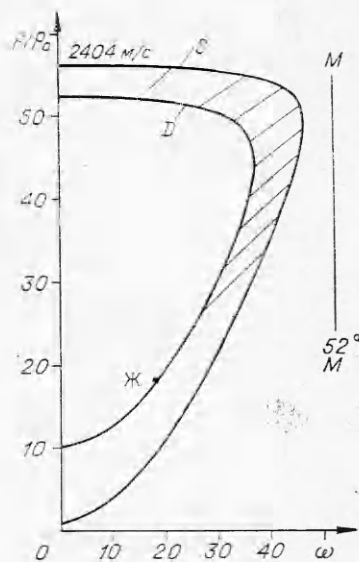


Рис. 3.

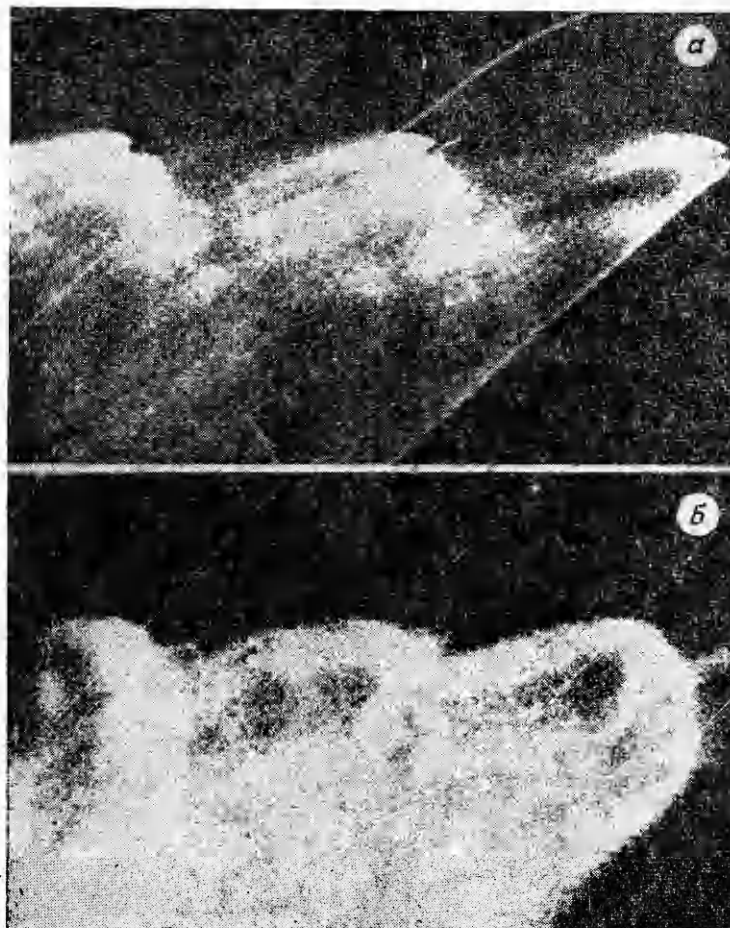


Рис. 4.

чёткого характера носика, как в $2\text{CO} + \text{O}_2$ (рис. 4, б). Отдельные элементы структуры и «голова» выражены менее четко. Часть этих различий объясняется ухудшением разрешающей способности аппаратуры, поскольку из-за большой скорости детонации в этом случае коэффициент уменьшения оптической системы приходится брать примерно в 1,5 раза больше. На качество фотографий влияет также низкая яркость свечения смеси.

Однако теплеровские снимки показывают, что дело не только в этом. Для спина в водородно-кислородной смеси фиксируются два типа структур. Один, подобный наблюдаемому в смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$ (рис. 5, а), имеет хорошо выраженный «носик» (рис. 5, б), хотя и с гораздо меньшим выдвиганием вперед, второй (рис. 5, в) — с острием, «носика», расположенным на уровне поперечной волны или даже чуть-чуть отстающим от нее. Такой теплерограмме соответствует картина скачков, приведенная на рис. 6. Здесь B_1 — четверная точка — результат взаимодействия маховской ножки AB_1 и ударной волны B_0B_1 , возникающей в свежем газе вследствие разлета продуктов детонации поперечной волны BC . B_1B_2 и B_1D — ударные волны. Такая картина в рассматриваемых условиях стационарной быть не может, так как возникающая в точке B волна разрежения будет ослаблять фронт BC (поперечная волна пересжата), вследствие чего, вблизи точки B может произойти срыв

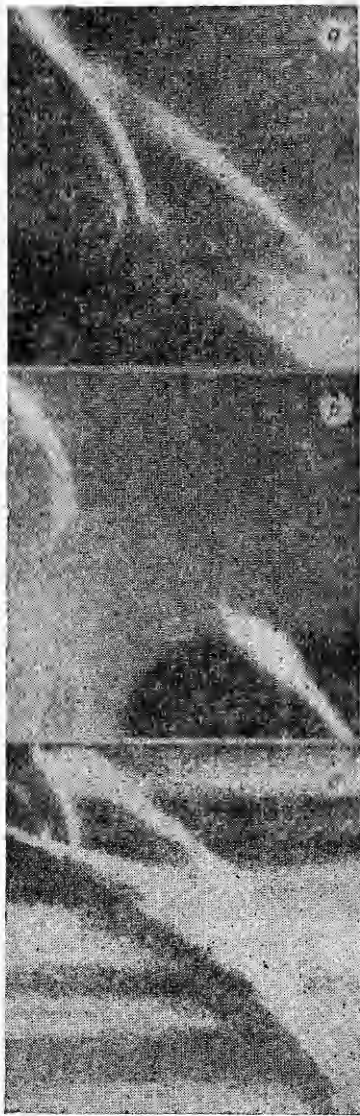


Рис. 5.

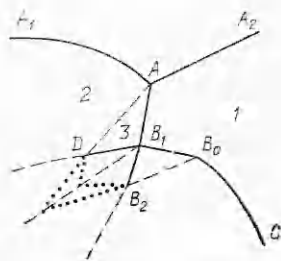


Рис. 6.

воспламенения. С другой стороны, в водородно-кислородной смеси температура за скачками B_1B_2 и B_1D мало отличается от температуры за ударной волной, движущейся по газу в области 1 со скоростью поперечной волны BC . Это говорит о том, что за скачками может происходить воспламенение смеси, которое будет захватывать область 3 и достигать точки A . В этот момент точка A выдвинется вверх по потоку, «носик» будет четко фиксироваться, на траектории будет замечен излом и уширение следа, а волна BC получит боковую «поддержку».

В момент, когда на траектории фиксируется излом, происходит изменение полной скорости набегающего потока и угла встречи его с волной AA_2 . Однако, как показывают расчеты, угол поворота потока на контактном разрыве ADE для смеси $2H_2+O_2$ никогда не превышает, по крайней мере, угла, на который способна повернуть вектор скорости ударная волна. Поэтому точка A со временем будет смещаться вниз по потоку, «носик» исчезает до тех пор, пока не произойдет новой вспышки.

Устойчивости спинового комплекса в круглых трубах способствуют силы инерции. В трубах меньшего диаметра (12 мм) спиновая детонация в смеси $2H_2+O_2+3Ar$ устойчива и не дает изломов на траектории [5]. В наших экспериментах изломы следа были невелики и, как показал расчет, линия MM почти касательна к ударной поляре.

Таким образом, для реализации устойчивого течения в голове спина, кроме существования решения с двумя тройными точками, необходимо выполнение условия образования «носика», заключающегося в том, что угол поворота контактного разрыва ADE превышает критическое значение. В противном случае система с двумя тройными точками неустойчива и реализуется лишь в одной из стадий наблюдаемого автоколебательного процесса. Для системы же с одной тройной точкой решения, удовлетворяющего экспериментальным данным, вообще не существует.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Bone, R. P. Fraser, W. H. Wheeler. J. Chem. Society, 1935, A, 235, 29.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. Газодинамика горения. М., «Наука», 1963.
4. Ю. Н. Денисов. ФГВ, 1974, 10, 3, 186.
5. В. И. Манжалеи, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5, 703.
6. Б. В. Войцеховский. Докл. АН СССР, 1957, 114, 4, 717.

УДК 622.23.026.001.57

О ДРОБЛЕНИИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

В. Н. Родионов, В. М. Цветков, И. А. Сизов, Б. Г. Лукишов

Дробление — это вид разрушения, при котором в некотором объеме образуется такое множество трещин, что материал может быть легко превращен в грудку кусков. В настоящей статье излагаются результаты лабораторных экспериментов, дающих представление о процессе дробления при взрыве камуфлетного заряда. В частности доказано совпадение фронта дробления, который при определенных условиях совпадает с фронтом ударной волны. Скорость распространения фронта дробления должна быть достаточно велика, чтобы не было сильного влияния трещин друг на друга. Другой механизм дробления — медленное, квазистатическое деформирование материала под нагрузкой. Процесс идет в объеме и не ограничен снизу по скорости. Второй процесс происходит за фронтом дробления и особенно велика эффективность в ближней к полости области. На периферии же роль второго механизма дробления, по-видимому, мала, так как характерный размер отдельности при одинаковых степенях деформации будет расти с масштабом взрыва [1] вследствие закона геометрического подобия.

Результаты лабораторных [2] и натуральных [3] исследований камуфлетного взрыва показывают, что на разных расстояниях от центра взрыва степень разрушения горной породы оказывается различной. Вблизи центра взрыва (на расстояниях до $5\div 6$ радиусов взрывной полости [2]) горная порода оказывается в сильно раздробленном состоянии, на больших расстояниях наблюдаются в основном единичные трещины, разделяющие массив на отдельные блоки. Будем исследовать процесс дробления твердой среды на множество кусков, происходящий на близких расстояниях от центра взрыва. В соответствии с этим под фронтом дробления будем понимать фронт распространения множества трещин, а не единичной трещины. Имеющиеся в настоящее время эмпирические данные описывают лишь конечный результат воздействия взрыва на горную породу — гранулометрический состав разрушенной среды [3, 4, 6]. Сведений о механизме дробления фактически нет.

Значительные трудности в исследовании механизма дробления горных пород взрывом связаны с тем, что все реальные горные породы непрозрачны, поэтому не применимы оптические методы исследования. Достаточно надежных методик, которые регистрировали бы динамику процесса дробления непрозрачных сред, не существует. Поэтому весьма важным оказывается метод лабораторного моделирования дробящего действия взрыва, когда, создавая определенные условия, можно рассчитать явление и попытаться выявить роль отдельных параметров, определяющих дробление взрывом.