

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

В. Е. ГОРДЕЕВ, Ю. С. МАТВЕЕВ, Я. К. ТРОШИН

ВЗРЫВ НИТРОГЛИЦЕРИНА В ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБКАХ

(Представлено академиком Я. Б. Зельдовичем 18 V 1970)

Механизм распространения так называемой детонации с малой скоростью (д.м.с.) в жидких взрывчатых веществах (в.в.) во многих работах связывается с захлопыванием кавитационных пузырьков перед фронтом взрыва. При этом единственной причиной кавитации все исследователи считают вибрации стенок жесткого сосуда, в котором обычно содержится детонирующая жидкость (¹⁻³). Но в ряде работ последнего времени природе д.м.с. все еще пытаются свести к спиновой детонации (см., например, (⁴)).

Цель предлагаемой работы состояла в отыскании опытных фактов, которые позволили бы сделать окончательный выбор между кавитационной и спиновой гипотезами д.м.с.

В настоящее время общие свойства спиновой детонации в газах изучены настолько, что можно с уверенностью считать невозможным распространение спина в трубе, если акустическая жесткость ее стенок не превышает произведения плотности детонирующего газа на его скорость звука. В этом случае спиновые волновые конфигурации (если они и смогут образоваться) будут неизбежно разрушены волнами разрежения.

Предварительные опыты с детонацией газа вблизи пределов при нормальном атмосферном давлении подтверждают это положение: даже пульсирующая детонация («многоголовый спин») быстро затухает, если на ее пути в достаточно узкой трубе создать продольную щель в стенке, где газ не будет отделен от окружающего воздуха никакой оболочкой и не успеет с ним смешаться. В связи с этим исследование возможности распространения д.м.с. в жидком в.в. в трубках с тонкими мягкими стенками приобретает определенный интерес.

Известно, что наиболее устойчивые режимы д.м.с. при слабом инициировании обнаруживает нитроглицерин (н.г.). В опытах использовался технический н.г. двух сортов: очищенный от летучих примесей и неочищенный. Между этими сортами имеется только одно существенное различие: чувствительность очищенного н.г. к возбуждению взрыва кавитацией на много выше чувствительности неочищенного (⁵).

В первой серии опытов изучалось распространение взрыва н.г. в трубках диаметром 8 мм, длиной 80 см, сделанных из полиэтилена толщиной 0,05 мм. Иницирование производилось электрическим разрядом конденсатора емкостью 3 мкф, заряженного до 7 кв, через алюминиевую проволочку толщиной 0,27 мм, длиной 5 мм. Распространение взрыва регистрировалось на фоторегистраторе ЖФР-3.

Оказалось, что при этих условиях взрыв неочищенного н.г. либо вообще не возникает, либо затухает сразу же после инициирования. Только в очищенном н.г. взрыв возникал безотказно и распространялся на 40—50 см со скоростью около 300 м/сек, причем остаток трубки с невзорвавшимся н.г. сохранялся невредимым. Постоянное значение скорости устанавливалось в течение 100—120 мсек на расстоянии около 3—6 см, а затухание было, как правило, резким, но иногда происходило и плавное.

Фоторазвертка такого процесса по виду ничем не отличается от хорошо известных типичных разверток д.м.с., обычно представляющих собой изоб-

ражение серии вспышек, более или менее регулярно следующих одна за другой. При распространении взрыва н.г. в полиэтиленовых трубках вспышки возникали с промежутками порядка 100 мсек, через каждые 2—3 см по длине трубки.

Главным условием распространения д.м.с. в тонкостенных трубках оказалась, таким образом, лишь высокая чувствительность н.г. к кавитационному инициированию взрыва. Но вибрации тонкой полиэтиленовой обложки не могли вызвать кавитацию н.г., и, следовательно, остается предположить, что для возникновения каверн вполне достаточно собственных колебаний жидкости. Поэтому была предпринята вторая серия опытов, в которых слабое инициирование взрыва очищенного н.г. в тонкостенных сосудах исследовалось при помощи высокоскоростной теневой киносъемки с экспозицией каждого кинокадра не более 10 нсек при высокой фотографической разрешающей способности.

Инициирование взрыва н.г., налитого в прозрачный цилиндр из целлофана толщиной 0,03 мм, как и в первой серии опытов, производилось электрическим взрывом алюминиевой проволоочки. Диаметр целлофанового цилиндра для облегчения условий инициирования был выбран вдвое большим (16 мм), чем диаметр полиэтиленовой трубки, а длина намного меньшей (60 мм), так как исследовалась только начальная стадия взрыва. На расстоянии 50 мм позади сосуда с н.г. вплотную друг к другу вертикально устанавливались 2 импульсные лампы ИФК-50, через которые одновременно с электрическим взрывом проволоочки разряжался конденсатор емкостью 100 мф, заряженный до 2,5 кв. Взрыв н.г. фотографировался на фоне свечения импульсных ламп фоторегистратором ЖФР-1 при максимальной скорости перемещения изображения по киноплёнке (4,5 км/сек). Непосредственно перед щелью прибора (шириной 2 мм) в фоторегистраторе был установлен электрооптический затвор Керра на нитробензоле, закрытый в нормальном положении. Специальное электрическое устройство открывало затвор через каждые 1,42 мсек на несколько нсек, так что на киноплёнке возникала серия кадров с изображением объекта, которое было меньше натурального лишь в 1,36 раза.

На рис. 1 (см. вкл. к стр. 1115) представлены 5 последовательных кадров, первый из которых снят по этой схеме через 10 мсек после начала инициирования. Ширина светлой части изображения целлофановой трубки соответствует 6 мм в натуре. В нижней части кадров видна тень от сферической каверны, которая со скоростью около 250 м/сек расширяется около взорвавшейся проволоочки. На втором кадре уже видны силуэты кавитационных пузырьков, число которых быстро увеличивается на каждом последующем кадре. Размеры пузырьков не превышают 0,5 мм, а область кавитации распространяется со скоростью около 2,5 км/сек.

Кавитационная зона впереди фронта разлетающегося вещества неизменно наблюдалась во всех повторных опытах с инициированием н.г. в целлофановой трубке. Фоторазвертки этого процесса, снятые без подсветки, свидетельствовали о том, что спустя 10—15 мсек после начала инициирования на расстоянии 2—3 см от взрывающейся проволоочки всегда появляются одна за другой 2—3 яркие вспышки, свечение которых продолжается 10—20 мсек. Та же картина наблюдалась и в случаях инициирования н.г. в прозрачных пробирках из стекла или плексиглаза.

Но покадровая теневая съемка этого процесса не обнаружила ни одного элементарного акта образования нового очага взрыва при захлопывании кавитационного пузырька. Наиболее вероятной причиной этих неудач могло быть то обстоятельство, что новые очаги взрыва возникали только в сильно возмущенной области, где жидкость была почти непрозрачна для света импульсных ламп.

Для проверки этого предположения была предпринята еще одна серия опытов по следующей схеме. Импульсная лампа ИФК-20, на которую разряжался конденсатор емкостью 100 мф, заряженный до 1,8 кв, устанавли-

валась позади прозрачной плоскостенной пробирки с очищенным н.г. Свет этой лампы модулировался ячейкой Керра (которая устанавливалась теперь непосредственно перед лампой) с той же частотой что и прежде. Изображение лампы строилось при помощи объектива «Телемар-2» (фокусное расстояние 75 см) на поверхности объектива И-51 камеры ЖФР-1. Расстояние между объективами было около 4 м, а объект съемки находился приблизительно на середине этого расстояния. Теневая картина объекта возникала на киноплёнке на фоне яркого пятна от светящейся лампы ИФК-20 всякий раз, когда открывалась ячейка Керра. В этих опытах размеры изображения получались в 2,78 раза меньше натуральных.

На рис. 2 (см. вкл. к стр. 1115) представлены 5 кадров, снятых по этой схеме. Кадры следуют друг за другом через 1,42 мсек. Первый кадр, как и на рис. 1, снят через 10 мсек после начала инициирования взрывающейся проволоочки. Ширина пробирки с н.г. составляла 15 мм, а расстояние между прозрачными стенками — 10 мм. Прозрачные стеклянные стенки имели толщину по 6 мм, боковые стенки были сделаны из толстого алюминия. Применение тонкостенных сосудов с мягкими стенками в этом варианте съемки было невозможно: вследствие более высокой чувствительности такой схемы к оптическим неоднородностям мягкой сосуд оказался бы практически непрозрачным для подсветки. Вместе с тем и в жестких пробирках при слабом инициировании сохраняется режим д.м.с.

В нижней части кадров видны подводящие провода. Белая горизонтальная полоса в середине, пересекающая все кадры, — развертка свечения плазмы иницирующего электрического разряда и нагретого им слоя н.г. Более узкие белые полосы снизу и сверху — следы новых светящихся образований, которые появились после начала инициирования. На всех кадрах, особенно внизу, хорошо видны волны сжатия, скорость которых (1,8 км/сек) превышает скорость звука в н.г. (1,7 км/сек). Скорость этих волн сжатия в других опытах этой серии достигала 2,1 км/сек, что соответствовало давлениям в несколько килобар. Хорошо заметны также волны, отраженные от боковых стенок и многочисленные пересекающиеся волновые фронты, которыми могло сопровождаться образование новых очагов взрыва. Кавитационные пузырьки при фотографировании по этой схеме не фиксировались, так как размеры изображения были вдвое меньшими по сравнению с рис. 1 и сильно сказывалось маскирующее влияние оптических неоднородностей.

Такой способ съемки, как видно из рис. 2, имел важное преимущество: одновременно с покадровой съемкой непрерывно регистрировалось собственное свечение д.м.с., которое прежде не пропускалось к негативу ячейкой Керра. Но начало свечения нового очага при таком способе съемки всегда могло случайно наложиться на любой участок кадра по его ширине. Таким образом, место возникновения очага трудно привязать к определенной точке изображения пробирки на рис. 2 (по горизонтали) или к какому-либо определенному волновому фронту.

Тем не менее рис. 2 и его сопоставление с рис. 1 могут служить основанием для следующих наблюдений. Во-первых, появление новых очагов свечения на рис. 2 совпадает по времени с началом образования кавитационной зоны на рис. 1. Во-вторых, свечение новых очагов трудно объяснить отражением света от поверхности трещин в стекле, вызванных взрывом проволоочки, так как некоторые очаги возникли очень близко к фронту волны сжатия, где стеклянная стенка еще не могла разрушиться. В-третьих, не отмечается никаких волновых конфигураций типа детонационного спина, а возникновение новых светящихся очагов действительно происходит в области н.г., которая возмущена таким большим количеством волновых фронтов, которое мешает вполне отчетливо проследить образование новых очагов взрыва. Движение жидкости в зоне реакции и разрушение стенок сосуда лишают смысла аналогичные попытки зарегистрировать под-

робности появления новых очагов и в более поздних стадиях, когда процесс распространения д.м.с. можно считать вполне установившимся.

Несмотря на это, совокупность фактов, установленных в описанных опытах, несомненно доказывает кавитационный механизм образования новых очагов взрыва в н.г. при распространении д.м.с. Наиболее важный факт состоит в том, что д.м.с. распространяется в мягких тонкостенных трубках лишь в том случае, когда н.г. достаточно чувствителен к инициированию взрыва кавитацией и что новые очаги взрыва появляются только после того, как возникла зона кавитации. Существенно отметить, что появление этой зоны неизбежно, так как оно вызывается растягивающими напряжениями, которые всегда образуются в жидкости вслед за ее сжатием при слабом инициировании, и не обязательно связаны с вибрациями стенок сосуда.

Авторы признательны Я. Б. Зельдовичу за обсуждение работы.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
12 V 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик, В. К. Боболев, ДАН, 161, № 5, 1152 (1965). ² R. W. Watson, C. R. Summers et al., Proc. IV Symp. (Intern.) on Detonation, 1965, Washington, 1967. ³ F. C. Bowden, M. P. McOnie, Nature, 206, № 4982, 380 (1965). ⁴ M. F. Zimmer, Combustion and Flame, 12, № 1 (1968). ⁵ В. Е. Гордеев, Ю. С. Матвеев, Физика горения и взрыва, 5, № 4, 589 (1969).