

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ МАЛОЙ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ В НИТРОГЛИЦЕРИНЕ

В. Е. Гордеев, Ю. С. Матвеев, Н. Ф. Велина

(Москва)

Величина малой скорости детонации в жидком нитроглицерине (НГ) бывает тем выше, чем шире трубка, в которой детонирует НГ, чем толще и прочнее ее стенки и чем сильнее инициирование взрыва [1]. Зависимость малой скорости от начальной температуры НГ до последнего времени не вызвала интереса. Между тем изучение этой зависимости становится целесообразным в связи с возрождением старой гипотезы о спиновом характере распространения детонации в НГ с малой скоростью.

Согласно [2], эта гипотеза впервые была высказана еще в 1962 г., т. е. почти сразу же после открытия спиновой детонации.

Сущность гипотезы состоит в аналогии между спиновой или пульсирующей детонацией в газах и процессом распространения детонации в НГ со скоростями, намного меньшими нормальной. Единственным основанием этой аналогии до последнего времени было лишь большое внешнее сходство между фоторазвертками детонации в газах и в НГ, которые представляют собой волнистые или даже прерывистые полосы, где хорошо различаются периодические выбросы [2]. В настоящее время известно, что такой характер фоторазверток детонации является результатом фоторегистрации неоднородностей, обусловленных неоднородной структурой фронта детонации [3, 4]. Природа такой неустойчивости детонационного фронта связана с кинетикой химической реакции в детонационной волне.

В работе [5] впервые удалось получить следовые отпечатки детонации, которая распространялась в НГ с малой скоростью. На толстых стенках полиэтиленовых трубок, в которых детонировал НГ, после взрыва оставались следы, по своей форме близко напоминающие отпечатки на закопченных стенках стеклянных трубок, где детонировала взрывчатая газовая смесь.

Таким образом, спиновая гипотеза «медленной» детонации в НГ получила новое, весьма веское подтверждение. Но если неоднородности фронта детонации, распространяющейся в НГ с малой скоростью, имеют ту же природу, что и неоднородности фронта детонации в газах, то даже сравнительно небольшое изменение начальной температуры вещества, реагирующего в детонационной волне, должно приводить к заметным изменениям ее параметров. Цель настоящей работы и состояла в экспериментальном исследовании этих изменений.

Предварительно были поставлены опыты, позволившие оценить влияние начальной температуры на детонационную волну в стехиометрической водородно-кислородной смеси.

Гремучая смесь, наполнявшая стеклянную трубку длиной 1100 мм с внутренним диаметром 15,5 мм, подогревалась намотанной на нее спиралью из нихромовой проволоки, через которую пропускался электрический ток. Детонация инициировалась электрическим взрывом алюминиевой проволоочки толщиной 0,27 мм и длиной 10 мм, через которую разряжался конденсатор емкостью 6 мкф, заряженный до 4 кв. Проволочка располагалась в трубке у одного из ее концов. В противополож-

ном конце в трубку вставляется слегка закопченный стеклянный диск диаметром 14 мм, позволявший получать торцовые отпечатки фронта детонации, по которым можно было судить о размерах его неоднородности, обусловленных кинетикой химической реакции.

Скорость детонации измерялась по фоторазверткам, которые получались при помощи новой скоростной кинокамеры ФК-1, разработанной в Институте физики Земли АН СССР. Начальное давление смеси (до ее подогревания) всегда составляло 100 мм рт. ст., а начальная температура бралась 20 или 100° С. После нагревания в течение 5 мин температура гремучего газа во всем пространстве внутри трубки принимала одно и то же значение.

Скорость детонации становилась постоянной спустя 500—600 мксек после инициирования на расстоянии 100—150 мм от начала трубки. При обоих начальных температурах это значение (в пределах ошибок измерений $\pm 1\%$) оказалось одним и тем же (2600 м/сек). Но неоднородности на фронте детонационной волны в нагретой смеси оказались значительно более мелкими, чем в «холодной» (рис. 1). Таким образом, увеличение скорости химической реакции в детонационной волне, которая распространяется по предварительно подогретой газовой смеси, приводит, как и следовало ожидать, к уменьшению времени индукции и к сокращению размеров неоднородностей.

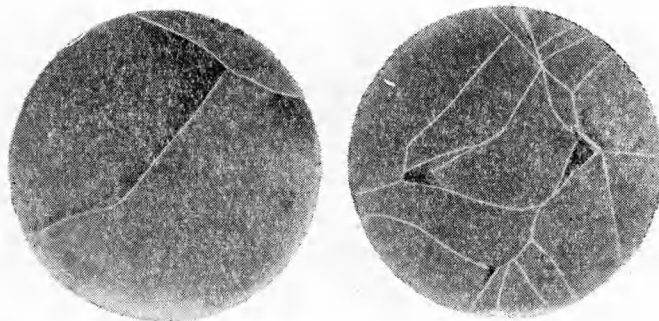


Рис. 1. Торцовые отпечатки детонационного фронта в гремучем газе: более крупные — при начальной температуре 20° С, мелкие — при 100° С. Диаметр диска 14 мм.

Аналогичные опыты были проведены с гремучей смесью при начальном давлении 760 мм рт. ст. И в этом случае скорость детонации в нагретой и в холодной смесях оказалась неизменной (2820 м/сек), а размеры неоднородностей фронта детонации в нагретой смеси сильно сократились по сравнению с «холодной».

Жидкий НГ выделялся из раствора в метаноле при помощи промывания водой, а затем выдерживался в эксикаторе с хлористым кальцием в течение нескольких суток. После этого НГ еще содержал летучие примеси, давление которых над его поверхностью составляло десятки миллиметров ртутного столба. Основная часть опытов проводилась именно с таким техническим НГ.

Исследованиями установлено, что чувствительность НГ к возбуждению взрыва кавитацией резко возрастает, если удалить из него летучие примеси, препятствующие образованию горячих точек при захлопывании кавитационных полостей. Поэтому часть опытов была проведена с НГ, очищенным от летучих примесей. Очистка производилась путем многочасового откачивания воздуха форвакуумным насосом из

стеклянного сосуда с НГ, подвергавшемся при этом попеременному нагреванию и охлаждению (от 20 до 90° С). Сосуд наполнялся таким образом, чтобы слой НГ в нем был как можно тоньше, а площадь свободной поверхности НГ — как можно больше. При откачивании сосуд время от времени осторожно встряхивался. Эти меры существенно улучшали качество очистки. Упругость паров очищенного таким способом НГ, измеренная обычным ртутным манометром с точностью до 0,5 мм рт. ст., не выходила за пределы этого значения даже при нагревании до 90° С.

Иницирование детонации в НГ осуществлялось электрическим взрывом погруженной в него алюминиевой проволоочки длиной 7 мм и диаметром 0,27 мм. Через проволоочку, одним концом присоединенную к экранированному проводу длиной 4,5 м (провод содержит 35 медных жил толщиной по 0,3 мм), а другим — к его оплетке, производился разряд конденсатора КБГП емкостью 6 мкф, заряженного до 4 кв. Индуктивность такого разрядного контура составляла около 1 мкГн и почти вся запасенная в конденсаторе энергия (48 дж) выделялась при взрыве проволоочки за время около 10 мксек.

Таким способом иницирования не удавалось вызвать взрыв кипящих нитрометана и тротила. Молотый тротил также не взрывался. Жидкий неочищенный НГ, налитый в пробирку с внутренним диаметром 12 мм при температуре не выше +2° С, также оказался нечувствителен к электрическому взрыву. При более высокой температуре НГ взрывался безотказно. Кристаллический НГ, затвердевший в стабильной форме, не взрывался под действием электрического взрыва проволоочки, хотя начальная температура такого НГ составляла +10° С. Интересно, что тот же самый НГ, расплавленный и охлажденный до +10° С, при тех же условиях взрывался безотказно.

Эти факты не только характеризуют слабость источника иницирования, но и показывают, насколько его эффективность зависела от начальной температуры НГ. Возбуждение взрыва в твердом НГ было невозможно, очевидно, потому, что затрата энергии на его плавление препятствовала повышению температуры, необходимому для возбуждения взрыва.

Детонация, возбужденная взрывом электрической проволоочки в НГ, налитом в стеклянную пробирку с внутренним диаметром 12 мм, распространялась со скоростью около 1 км/сек, если начальная температура НГ составляла 18° С. При переходе в ту часть пробирки, где находился либо жидкий НГ, охлажденный до температуры +2° С, либо твердый НГ (в стабильной форме и при любой температуре ниже точки плавления), такая детонация всегда затухала. Очищенный жидкий НГ взрывался в этих условиях и при 0° С.

Зависимость величины малой скорости детонации в НГ от его начальной температуры исследовалась в опытах со стеклянными пробирками внутренним диаметром 6 мм, толщиной стенок 1 мм и длиной 300—400 мм. Снаружи пробирки обматывались нихромовой проволокой толщиной 0,5 мм. Расстояние между витками составляло 2 мм. При помощи асбестовых шнуров пробирка укреплялась на вертикальной стойке и в нее наливался НГ, который нагревался до необходимой температуры пропусканием электрического тока через нихромовую обмотку. При этом вследствие конвекции в нижней части пробирки температура обычно оказывалась ниже, чем в верхней на 10—15° С. Взрыв иницировался проволоочкой всегда в верхней части пробирки. В некоторых опытах пробирки с НГ нагревались до необходимой температуры полным или частичным погружением в заранее нагретые жидкости (в

воду, в масло для диффузионных насосов). Опыты показали, что при прочих равных условиях наличие обмотки или присутствие жидкости у стенок пробирки практически не сказывается на величине малой скорости детонации.

Распространение детонации регистрировалось при помощи ждущего фоторегистратора ЖФР-3. Скорость детонации вычислялась по наклону развертки распространения взрыва.

При начальной температуре неочищенного НГ 18°C в пробирках диаметром 6 мм детонация либо вообще не распространялась, либо очень быстро затухала, так что часть пробирки, не разрушенная электрическим взрывом погруженной в него проволоочки, даже сохранялась вместе с НГ. Но уже при начальной температуре 30°C по всей длине пробирки с неочищенными НГ распространялась серия отдельных слабо светящихся вспышек со скоростью около 700 м/сек (3—4 вспышки на длине 200—300 мм).

В очищенном НГ детонация распространялась и при 18°C со скоростью 460 м/сек. Фоторазвертка этого процесса представляет собой изображение серии отдельных вспышек, возникающих последовательно по всей длине пробирки приблизительно через каждые 30 мксек на расстоянии около 15 мм друг от друга. Яркость вспышек была различной, но их появление отличалось большой регулярностью, позволяющей приписать этому процессу скорость распространения, обладающую строго постоянным значением уже на расстоянии около 100 мм от места иницирования взрыва.

С увеличением начальной температуры НГ скорость детонации возрастала, а выбросы на развертке располагались все теснее. При $t_0 = 130^\circ\text{C}$ в верхней части пробирки НГ становился бурым и побурение быстро распространялось сверху вниз. При 145°C в верхней части пробирки появлялись мелкие пузырьки окислов азота, которые, поднимаясь выше, увеличивались в объеме. При возбуждении детонации взрывом проволоочки фронт взрыва всегда распространялся из области, содержащей пузырьки диаметром в 2—3 мм, в нижнюю половину пробирки, где пузырьки еще не успевали возникнуть. Несмотря на это, при распространении сверху вниз скорость детонации никогда не уменьшалась.

Время, в течение которого плавно устанавливалось постоянное значение скорости детонации, как правило, не превышало 10—12 мксек, но в некоторых случаях (например, при $t_0 = 145^\circ\text{C}$) оно достигало 40—50 мксек. В некоторых опытах оно не превышало 1—2 мксек.

Результаты измерений скорости детонации D в НГ в зависимости от начальной температуры t_0 приведены ниже.

$t_0, ^\circ\text{C}$	$D, \text{ км/сек}$
30	0,72
40	1,2—1,54
80	1,7
100	1,7
130	1,8
145	2—2,35

Каждому значению D соответствуют результаты 3—4 опытов. В большинстве опытов значения D сохранялись неизменными на большей части длины пробирки и хорошо воспроизводились от опыта к опыту. Разброс значений D наблюдался только при температурах 40 и 145°C . В первом случае была дважды зарегистрирована скорость 1,2 км/сек и один раз — 1,54 км/сек. Во втором случае в одном из трех опытов скорость детонации спустя 12 мксек после завершения электрического разряда достигала строго постоянного значения 2,35 км/сек.

В двух других опытах скорость детонации спустя 40—50 мксек приобрела значение несколько более 2 км/сек, которое затем скачком изменялось, сразу достигая так называемого нормального значения 7,65 км/сек. Развертка распространения скорости детонации в одном из таких опытов представлена на рис. 2.

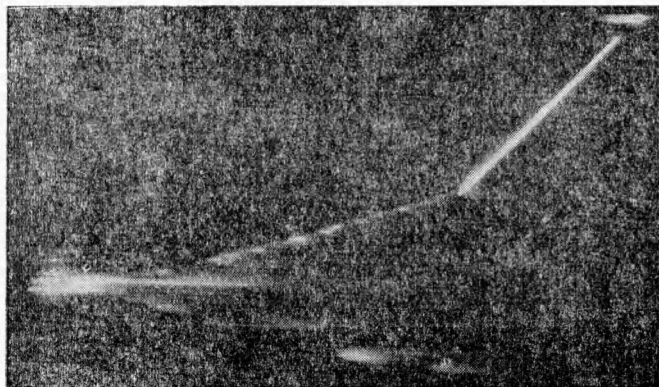


Рис. 2. Щелевая развертка распространения фронта детонации в нитроглицерине. Место, где произошло инициирование взрыва, изображено в нижней части. Полное время, прошедшее с момента инициирования, ~ 90 мксек, расстояние от точки инициирования до места прекращения детонации — 330 мм.

На фотографии видно, что отдельные выбросы, имеющиеся на той части развертки, которая соответствует $D=2$ мк/сек, становятся совершенно незаметными на ее верхней части, где $D=7,65$ км/сек (для удобства фоторазвертка перевернута, и распространение взрыва показано снизу вверх).

Следует отметить, что, во-первых, переход малой скорости детонации в нормальную возник при $D=2$ км/сек, но перехода не было, когда это значение достигало 2,35 км/сек. Во-вторых, этот переход произошел почти посередине пробирки, т. е. в той ее части, где t_0 было заведомо меньше, чем на уровне инициирования, где, кроме того, было много пузырьков, содержащих окислы азота.

Опыты с НГ, очищенным от летучих примесей и имеющим повышенную чувствительность к возбуждению взрыва кавитацией, проводились при температуре 18 и 40°С. В последнем случае величина скорости детонации не вышла за пределы значений, найденных при этой температуре для неочищенного НГ, и составила 1200 м/сек.

Влияние стенок сосуда на скорость детонации проверялось опытами при 18°С (очищенный НГ) и 40°С (неочищенный НГ). НГ наливался в трубочки из целлофана или полиэтилена диаметром 6 мм и толщиной стенок 25 мк и нагревался погружением трубки в теплую воду на глубину 10—15 мм.

Изменения скорости детонации НГ в сосудах с эластичными тонкими стенками дают значения 280 м/сек (18°С) и 850 м/сек (40°С). В пробирке со стеклянными стенками при тех же температурах детонация распространяется намного быстрее (460 и 1200—1540 м/сек).

Результаты описанных опытов еще не позволяют сделать вполне однозначное заключение о природе и о механизме распространения де-

тонации в НГ с малой скоростью. Тем не менее они позволяют сделать некоторые существенные выводы и предположения.

Сопоставление опытов, проведенных с очищенным и неочищенным от летучих примесей НГ при одинаковых условиях, показывает, что чувствительность НГ к кавитации не определяет величины малой скорости детонации. Иначе при 40°С скорости детонации в очищенном и неочищенном НГ были бы различны. Но в действительности они совпадают. Следовательно, увеличение малой скорости детонации в НГ с увеличением его начальной температуры (и, следовательно, с увеличением чувствительности к кавитационному инициированию взрыва) нельзя объяснить кавитацией.

В менее чувствительном к кавитационному инициированию неочищенном НГ при 18°С детонация либо вообще не возникала, либо не могла распространяться. В очищенном НГ она возникала и распространялась со скоростью 460 м/сек. Из этого факта можно сделать один весьма важный вывод: кавитация действительно служит причиной образования очагов реакции при распространении в НГ детонации с малой скоростью (см., например, [6]).

Детонация может распространяться с малой скоростью по НГ, налитому в трубки с тонкими эластичными стенками, колебания которых совершенно не способны вызвать кавитацию. Следовательно, каверны в детонирующем с малой скоростью НГ образуются вследствие колебаний, распространяющихся по самой жидкости. Но в этом случае наиболее эффективными источниками инициирования должны быть только те каверны, которые ближе остальных расположены к уже возникшим очагам взрыва и потому подвергаются наиболее сильному механическому воздействию. Такой вывод находится в полном согласии и с тем экспериментальным фактом, что пристеночные кавитационные пузырьки, появление которых в стеклянных трубках обычно намного опережает фронт детонации в НГ, как правило, не создают очагов реакции и не изменяют скорости ее распространения. В противном случае процесс взрыва носил бы беспорядочный характер, так как очаги взрыва возникали бы одновременно во многих местах во всей массе НГ на разных расстояниях от первоначального источника инициирования. В действительности же существует своеобразная «очередность» возникновения очагов реакции.

Полагая, что процесс распространения детонации в НГ с малой скоростью сводится к последовательному возникновению отдельных очагов реакции, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, увеличение скорости детонации при нагревании НГ можно объяснить тем, что в нагретом НГ скорость реакции возрастает. Это должно приводить к тому, что воздействие уже возникших очагов реакции на образовавшиеся поблизости каверны усиливается, а количество новых очагов и скорость их возникновения возрастают в соответствии с увеличением скорости реакции. При достаточно высокой начальной температуре НГ очаги реакции, возникшие при захлопывании каверн, смогут создать ударную волну, способную нагреть нитроглицерин настолько, что детонация станет распространяться в нормальном режиме.

Результаты описанных экспериментов, однако, допускают и другое истолкование [5], в котором кавитация уже не играет никакой роли.

Сокращение числа вспышек и полос на фоторазвертках при понижении начальной температуры детонирующего НГ может быть объяснено сокращением размеров неоднородностей на фронте детонации подобно тому, как это бывает при изменении начальной температуры детонирующей гремучей смеси. Но увеличение скорости детонации в нагретой

гремучей смеси, в отличие от НГ, заметить не удалось. Возможно, что предполагаемое увеличение скорости детонации в этом случае компенсируется ее уменьшением вследствие усиления диссоциации молекулы H_2O в детонационной волне, распространяющейся в нагретом газе. Во всяком случае полной аналогии между процессами в газовой смеси и в жидком НГ обнаружить пока не удалось. Тем не менее установленные факты могут оказаться полезными в дальнейших исследованиях природы детонации, распространяющейся с малой скоростью.

Поступила в редакцию
14/IX 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев, Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, 1960.
2. А. Я. Апин, В. К. Боболов. Докл. АН СССР, 1947, 58, 2, 241.
3. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
4. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, Докл. АН СССР, 1960, 139, 1, 137.
5. M. F. Zimmer. Combustion and Flame, 1968, 12, 1, 1.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболов. ФГВ, 1967, 3, 4, 493.

УДК 662.215.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА СВАРКИ БИМЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

Л. С. Амелина, Ю. В. Гаек, А. Н. Свириденко
(Днепропетровск)

Соударение металлических образцов при сварке взрывом представляет интерес не только в смысле изучения механических взаимодействий и эффектов, исследовавшихся уже в ряде работ [1—4], но и с точки зрения анализа физико-химических процессов, протекающих в зоне соударения, и энергетических затрат на эти процессы.

В настоящей работе приводятся некоторые экспериментальные данные, характеризующие энергоемкость сварки взрывом меди с нержавеющей сталью. Эксперименты выполнены на трубчатых образцах.

Сварка взрывом биметаллических труб заключается в следующем. Две трубы сочленяются коаксиально между собой таким образом, что между ними остается равномерный по периметру кольцевой зазор. Затем при помощи взрыва производится раздача внутренней трубы или обжатие наружной [3]. Процесс вовлечения в движение точек раздаваемой или обжимаемой трубы распространяется в осевом направлении со скоростью детонации заряда взрывчатого вещества (в экспериментах порядка 3000 м/сек).

При этом происходит накатывание стенки трубы, подвергшейся действию взрыва, на стенку неподвижной трубы. Если раздача или обжатие трубы протекает с достаточной радиальной скоростью, то на границе соударения развиваются интенсивные пластические деформации, спо-