

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 2

1965

УДК 532.593+534.222.2

M. Я. Васильев

(Москва)

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА УДАРОМ. I. РАЗВИТИЕ ВЗРЫВА

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе рассматривается взрыв, происходящий вследствие быстрого теплового разложения ВВ в результате удара по поверхности заряда свободнолетящей в пространстве плоской пластинкой.

Метание пластиинки осуществлялось с помощью заряда ВВ, но могло быть выполнено с помощью модели электрической пушки. С целью исключения воздействия на исследуемое вещество продуктов взрыва метающего заряда был использован метод искусственного откола.

Действие взрыва на преграду при известных условиях вызывает откол слоя материала с обратной ее стороны. Зная толщину откольного слоя, которая рассчитывается приближенно, можно изготовить преграду, состоящую из двух шлифованных пластинок, склеенных мастикой таким образом, чтобы одна из них, являемая откольной, отрывалась при ударе по месту их стыка и приобретала заданную скорость. Откол происходит в месте встречи волн разгрузки, распространяющихся от двух противоположных поверхностей системы столкнувшихся пластинок. По предполагаемой методике запуска откольной плоской пластиинки исключается воздействие на исследуемую систему продуктов взрыва метающего заряда.

Схема опыта по возбуждению взрыва ударом приведена на рис. 1. Метающий заряд 1 состоит из относительно тонкого слоя ВВ и линзы из инертного вещества, необходимой для придания ударной волне плоского выхода фронта, одновременно достигающего всей поверхности торца заряда. Метающий заряд прессовался из смеси тротил — гексоген 50/50, линза — из бензойной кислоты. Для ослабления действия заряда в качестве дополнительной преграды прессовался диск 2 из бензойной кислоты.

Удар по преграде из склеенных стальных дисков 4, 5 производился не непосредственно продуктами взрыва метающего заряда, а с помощью дюралевого диска 3. Между зарядом и дюралевым диском устанавливался зазор 3 мм, между дюралевым диском и преградой — 5 мм. Введение зазоров было определено необходимостью создания условий более правильной передачи удара дюралевым диском. Преграда 4 — это стальной диск диаметром 150 мм и толщиной 6 мм, с одной стороны которого с помощью мастики приклейена стальная откольная пластиин-

ка 5. При ударе дюралевой пластинки 3 по стальной преграде с обратной ее стороны по месту стыка происходит откол приклеенной стальной пластиинки 5, которая после 10 мм пути по воздуху ударяет в плоский торец 7 исследуемого заряда, взятого в форме цилиндрической шашки диаметром 70 мм. Для изучения теплового возбуждения взрыва ударом в отличие от методики Каста количество исследуемого вещества в опыте было в 6000 раз больше и составляло 180 г вместо 0,03 г.

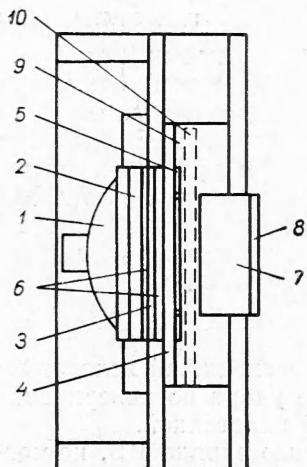


Рис. 1. Схема опыта по возбуждению взрыва ударом.

свеченного взрывом бумажного экрана 9. Вспомогательный заряд 10 для подсветки экрана инициировался одновременно с метающим зарядом. Скорость полета откольных стальных пластинок была определена с помощью осциллографов в зависимости от массы метающего заряда. В дальнейшем, при проведении опытов, скорость стальной откольной пластиинки задавалась соответствующей массой метающего заряда.

Вследствие того, что продукты взрыва метающего заряда отсекаются преградой и не следуют за откольной пластиинкой, все стадии взрывчатого разложения исследуемого ВВ могут изучаться с помощью лупы времени.

На кадрах лупы времени можно наблюдать наличие или отсутствие взрыва исследуемого заряда (рис. 2). Наличие или отсутствие взрыва можно наблюдать так же по пробою отверстия в стальной преграде откольной пластиинкой.

Вследствие возбуждения взрыва исследуемого заряда ударившая по нему откольная пластиинка отбрасывается в обратном направлении и пробивает в стальном диске сквозное отверстие.

В каждом опыте по исследованию возбуждения взрыва получаем также приближенное значение времени взрывчатого превращения, т. е. времени от момента соприкосновения ударяющей пластиинки с зарядом до начала максимальной скорости взрывчатого разложения. Удар пластиинкой по поверхности ВВ позволяет изучать с помощью лупы времени механическое разрушение, воспламенение, горение, образование и рост очагов разогрева, время взрывчатого превращения, взрыв и влияние ряда характеристик заряда на возбуждение горения и взрыва ударом.

Возбуждающие взрыв стальные пластиинки были взяты толщиной 1, 2 и 3 мм и соответственно им рассчитаны и экспериментально опробованы толщины ударяющих дюралевых пластиинок, оказавшихся равными 1,4; 3 и 4 мм.

Если не соблюдать соотношения толщин ударяющих и откольных пластиинок, откол будет образовываться не по искусственному стыку пластиин, а в толще одной из них (преграды или откольной пластиинки). Чтобы уменьшить влияние разгрузки краев в теле откольной пластиинки, делалась канавка и заполнялась материалом с резко отличной плотностью (например, свинцом или мастикой). Это позволило увеличить скорость краев менее разгруженной центральной части откольной пластиинки и на диаметре 70 мм сделать ее более плоской и отделить от разгруженных краев (от 70 до 100 мм). Наблюдение за процессом взрывчатого разложения производилось на фоне под-

свеченного взрывом бумажного экрана 9. Вспомогательный заряд 10 для подсветки экрана инициировался одновременно с метающим зарядом. Скорость полета откольных стальных пластинок была определена с помощью осциллографов в зависимости от массы метающего заряда. В дальнейшем, при проведении опытов, скорость стальной откольной пластиинки задавалась соответствующей массой метающего заряда.

Вследствие того, что продукты взрыва метающего заряда отсекаются преградой и не следуют за откольной пластиинкой, все стадии взрывчатого разложения исследуемого ВВ могут изучаться с помощью лупы времени.

На кадрах лупы времени можно наблюдать наличие или отсутствие взрыва исследуемого заряда (рис. 2). Наличие или отсутствие взрыва можно наблюдать так же по пробою отверстия в стальной преграде откольной пластиинкой.

Вследствие возбуждения взрыва исследуемого заряда ударившая по нему откольная пластиинка отбрасывается в обратном направлении и пробивает в стальном диске сквозное отверстие.

В каждом опыте по исследованию возбуждения взрыва получаем также приближенное значение времени взрывчатого превращения, т. е. времени от момента соприкосновения ударяющей пластиинки с зарядом до начала максимальной скорости взрывчатого разложения. Удар пластиинкой по поверхности ВВ позволяет изучать с помощью лупы времени механическое разрушение, воспламенение, горение, образование и рост очагов разогрева, время взрывчатого превращения, взрыв и влияние ряда характеристик заряда на возбуждение горения и взрыва ударом.

Точность метода определяется отклонением скорости пластиинки от критического значения при возбуждении взрыва на ± 2 м/сек. Превышение критической скорости на 2 м/сек дает 100% взрывов, а уменьшение скорости на 2 м/сек — 100% отказов.

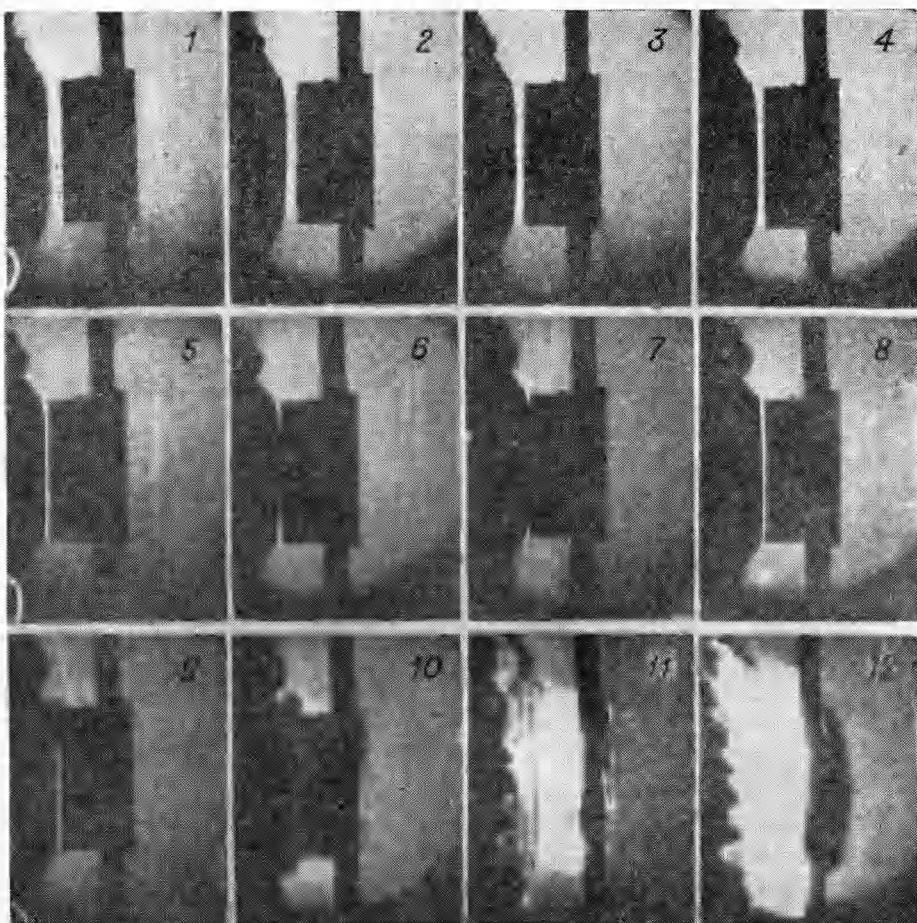


Рис. 2. Взрыв тротила ($\rho = 1,54$ г/см³), вызванный ударом по поверхности заряда стальной пластиинкой толщиной 3 мм со скоростью 500 м/сек. Время между кадрами 2,65 мкесек (уменьшено в 3,68 раза, диаметр заряда 70 мм).

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА УДАРОМ

Рассмотрим развитие взрыва при ударе пластиинки по поверхности заряда ВВ. На границе соударения пластиинки и исследуемого заряда возникает свечение воздуха, которое продолжается 3—5 мкесек, и при малой скорости пластиинка не вызывает загорания вещества.

При малой скорости пластиинки происходит механическая деформация и разрушение заряда, увеличение скорости пластиинки вызывает вспышку и загорание вещества, еще большее увеличение скорости пластиинки приводит к взрыву. Деформация тротилового заряда из цилиндрической формы в коническую, а также загорание вещества, растекающегося вместе с продуктами взрыва по поверхности удариившей пластиинки,

можно видеть на серии кадров лупы времени (рис. 3). Вязкопластическое течение на границе соударения пластиинки и заряда сопровождается горением и свечением ВВ, которое постепенно ослабевает. Взрыва не происходит. В ряде опытов можно наблюдать беспламенное распространение продуктов горения. При ударе по поверхности заряда пластиинкой, после некоторого индукционного периода наблюдается дымообразование, т. е. распыление продуктов разложения вещества в окружающее пространство с резко выраженной границей распространения облака (рис. 4).

При максимальной скорости дымообразования можно видеть свечение газов (кадры 3, 4). Взрыва заряда не происходит. Горение с ярко выраженным свечением было получено на опытах с пикриновой кислотой (рис. 5). В начальной стадии скорость горения пикриновой кислоты мала, но быстро возрастает со временем, достигая через 65 мксек — 600 м/сек. Горение развивается после значительного периода индукции. Взрыва не происходит — заряд сгорает.

Быстрое горение заряда, дефлаграцию с дымообразованием и слабым свечением можно наблюдать у тротила (рис. 6). Скорость распро-

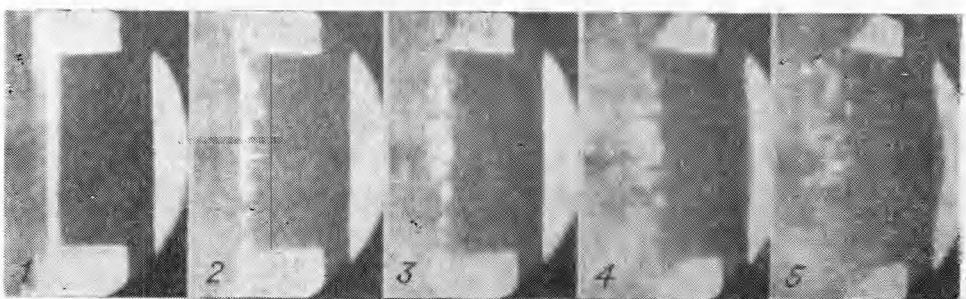


Рис. 3. Деформация и вязкопластическое течение на границе соударения пластиинки и тротилового заряда ($\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$); скорость стальной пластиинки 477 м/сек. Время между кадрами 5,3 мксек. Уменьшено в 2,8 раза.

странения фронта горения составляет 1400—1600 м/сек. Взрыв слабо выражен, заряд сгорает. При увеличении скорости ударяющей пластиинки можно исследовать все стадии процесса возбуждения взрыва (рис. 7). Первоначально на торце заряда происходит вспышка, которая вызывает горение с дымообразованием по фронту. Несколько позднее вспышки образуются очаги разогрева (кадр 7). Образование очагов разогрева в процессе возбуждения взрыва обнаружено впервые. Исследовалось увеличение количества и размеров очагов разогрева во времени. При сжатии заряда резким ударом происходит нагревание и незначительная ионизация вещества, образование активных радикалов. В зависимости от скорости ударной волны и характера исследуемого вещества ионизация изменяется в широких пределах. Прессованный заряд представляет систему с неравномерным распределением плотности. При прохождении ударной волны, сжимающей и ионизирующей вещество, возникающее тепло распределяется по системе также неравномерно. В воздушных включениях между кристаллами происходит столкновение ударных волн, относительно большее выделение тепла и большая ионизация вещества. В результате столкновений ударных волн в местах наибольшей плотности тепловой энергии и большей ионизации возникают очаги разогрева. Как следствие неравномерного распределения энергии при сжатии вещества суммарная скорость химической реакции увеличивается,

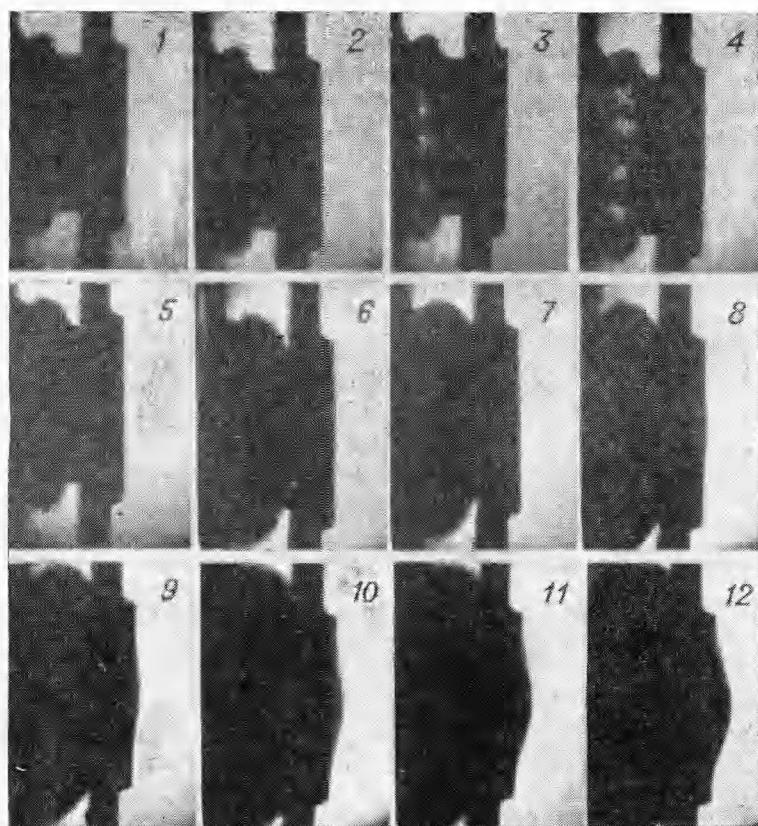


Рис. 4. Дымообразование при ударе стальной пластинкой по тротиловому заряду ($\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$). Время между кадрами 2,65 мксек. Уменьшено в 3,41 раза.

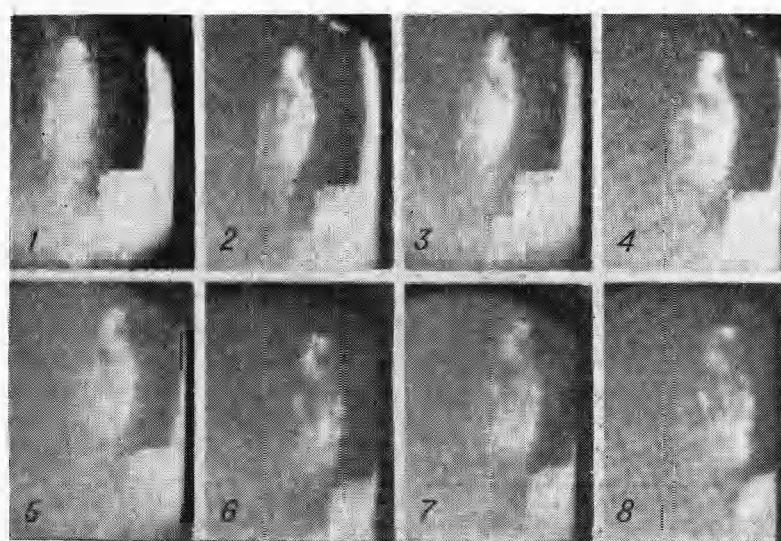


Рис. 5. Горение заряда пикриновой кислоты ($\rho = 1,585 \text{ г/см}^3$) при ударе стальной пластинкой толщиной 3 мм со скоростью 430 м/сек. Время между кадрами 2,65 мксек. Уменьшено в 3,5 раза.

система находит более быстрый и легкий путь перехода к равновесному состоянию (сравнительно с равномерным распределением тепла).

Скорость возникновения очагов разогрева и их величина определялись путем непосредственного счета и замера под микроскопом по последовательно полученным кадрам лупы времени (см. рис. 7). Результаты подсчета количества горячих точек на определенной площади и замера их диаметра на пленке лупы времени с помощью компратора ИЗА-2 приведены в таблице.

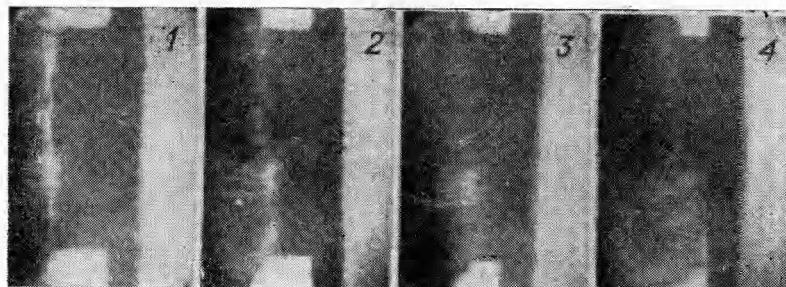


Рис. 6. Дефларгация — быстрое горение — тротилового заряда ($\rho = 1,60 \text{ г/см}^3$) при ударе стальной пластинкой толщиной 3 мм со скоростью 530 м/сек. Время между кадрами 2,65 мксек. Уменьшено в 2,41 раза.

Очаговое горение развивается двумя путями: а) возникающие очаги остаются почти постоянными по диаметру, а число их быстро растет (таких очагов большинство); б) какой-то из очагов быстро увеличивается в диаметре (отдельные очаги).

Отдельные быстрорастущие очаги разогрева исследовались глазным образом при возбуждении взрыва зарядов из гексогена. Они уве-

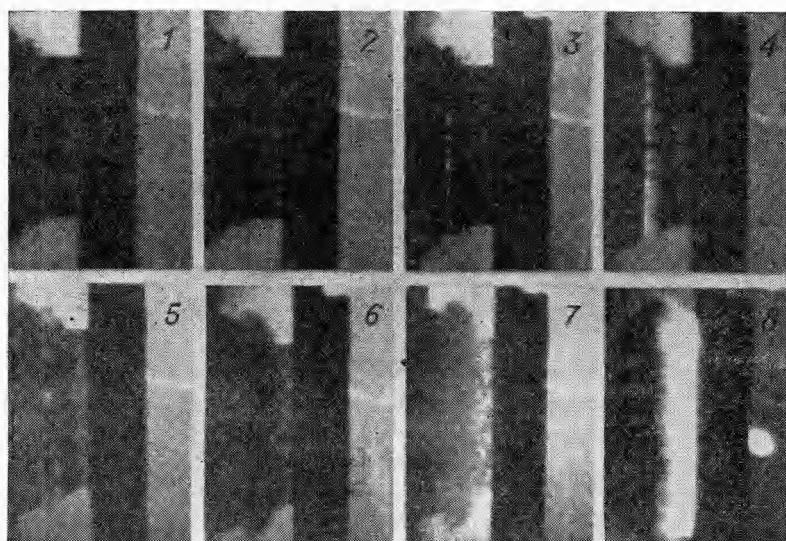


Рис. 7. Взрыв тротила ($\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$) при ударе пластинкой толщиной 1 мм со скоростью 500 м/сек. Время между кадрами 2,65 мксек. Уменьшено в 3,33 раза.

Таблица

Увеличение числа очагов разогрева во времени
(кадры следуют через 2,65 мксек)

№ опыта и дата испытаний	Исследуемое ВВ	Скорость ударяющей пластинки, м/сек	Среднее время реакции, м/сек	Время до кадра, м/сек	Диаметр очага, мм	Число очагов
168, 1961 г.	Тротил (пластинка 1 мм)	478	16	8,70 11,35 14,00	0,41 0,42 0,40	8 16 79
172, 1961 г.	То же	484	16	8,70 11,35 14,00	0,41 0,41 0,41	2 12 80
65, 1962 г.	»	480	16	8,70 11,35 14,00	0,42 0,42 0,42	9 16 79
165, 1961 г.	Гексоген (пластинка 3 мм)	—	23	15,05 17,70 20,35	0,35 0,35 0,35	2 11 88
5, 1962 г.	То же	—	23	10,4 15,7 21,0	0,44 0,71 1,00	1 1 1
5, 1962 г.	»	—	23	10,4 15,7 21,0	0,26 0,60 0,86	1 1 1
65, 1962 г.	Тротил (пластинка 1 мм)	—	16	6,05 8,70 11,35 14,00	0,18 0,60 0,39 0,58	1 1 1 1

личиваются в диаметре в течение 10 мксек до $0,75^{-1}$ мм (рис. 8). В отдельных опытах с тротилом диаметр быстрорастущего очага пульсировал (периодически увеличивался или уменьшался). Считались не все очаги, а лишь наиболее яркие и, следовательно, находящиеся на поверхности заряда. Размеры очагов, как правило, находились в пределах 0,3—0,4 мм и только отдельные очаги развивались до величины 0,8—1 мм. Счет и измерение очагов разогрева производились на 3—4 кадрах лупы времени, следующих в данных опытах через 2,65 мксек, т. е. в течение 8—11 мксек.

Размеры большинства очагов за период индукции изменяются незначительно. Диаметр очагов у тротилового заряда ($0,4 \cdot 10^{-1}$ см) во много раз больше предполагаемого (10^{-4} см). Зависимость числа очагов от времени реакции приведена на рис. 9. Очаговое горение всегда переходит в детонацию.

Исследовалось влияние на возбуждение взрыва воздушных зазоров по стыкам зарядов и трещин. Проводились опыты с тротиловым зарядом, состоящим из двух шашек, в одной из которых была трещина. Свечение воздуха по стыку шашек и в трещине наступает после прохождения ударной волны, взрыв же заряда — значительно позднее. Эти опыты отчетливо показали, что ударная волна и взрыв разделены во времени и пространстве. Ударная волна проходит раньше, чем взрыв разовьется.

Из полученных данных ясно, что представление авторов работы [2] о возбуждении во фронте ударной волны возникающей мгновенно детонации в неидеальном режиме совершенно недостаточно для описания возбуждения взрыва при действии на заряд более слабыми ударными волнами. Из проведенных опытов следует, что взрыв на данном участке заряда может возникнуть через 15—20 мксек после прохождения ударной волны, которая, зарождая очаги разогрева, уходит из зоны реакции, и тепловой взрыв, а не детонация, завершает реакцию взрывчатого разложения. Это объясняется тепловой природой взрыва. Первоначально медленное развитие реакции сменяется очаговым горением, а затем быстрым взрывным ее завершением.

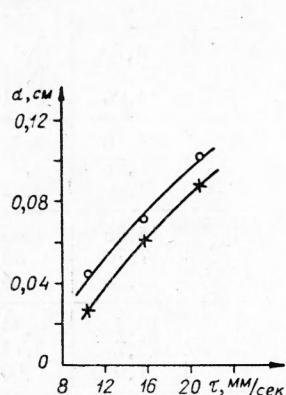


Рис. 8. Рост диаметра очагов разогрева во времени.

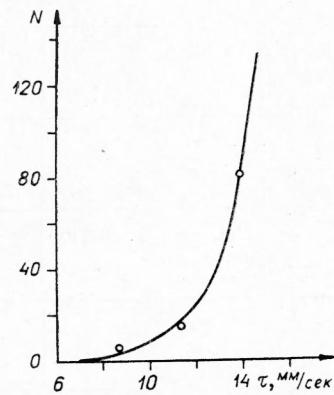


Рис. 9. Увеличение числа очагов разогрева (горячих точек) во времени.

Детонационная волна в случае ограниченной зоны теплового разложения при ударе формируется позднее. При увеличении мощности удара время реакции возбуждения взрыва сокращается и только при мощности соответствующей удару детонационной волны это время становится равным времени реакции во фронте детонационной волны. Увеличение скорости ударной волны объясняется увеличением скорости реакции во всей массе вещества за фронтом волны и соответствующим увеличением действия на ударный фронт тепловой волны, которая нагоняет и усиливает его. При возбуждении взрыва совсем не обязательно увеличение скорости ударной волны при прохождении ее по исследуемому образцу. В описываемых опытах при ударе по заряду пластинкой толщиной 1 мм скорость ударной волны затухала почти как в инертном материале, тем не менее взрыв происходил.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика возбуждения взрыва ударом пластинки по поверхности заряда. Точность метода характеризуется отклонением скорости пластиинки от критического значения при возбуждении взрыва на $\pm 2 \text{ м/сек}$. Превышение критической скорости на 2 м/сек дает 100% взрывов, а уменьшение критической скорости на 2 м/сек — 100% отказов.

Метод позволяет исследовать процесс возбуждения во всех его стадиях и широком диапазоне изменения скорости и массы ударяющего тела.

2. В зависимости от силы удара пластинкой, т. е. от количества введенного ударом тепла, можно наблюдать различные стадии взрывчатого разложения: дымообразование, вспышку, горение со светящимся пламенем по фронту, дефлаграцию (быстрое горение), очаговое горение, взрыв. Определялось время возбуждения взрыва.

3. Впервые обнаружено образование очагов разогрева в процессе возбуждения взрыва¹. Исследовалось увеличение количества и размеров очагов во времени. Диаметр очагов у тротилового заряда оказался равным 0,4 мм, у гексогенового 0,35 мм. Обнаружено два режима очагового горения: а) возникающие очаги остаются почти постоянными по диаметру, но число их быстро растет; б) развиваются одиночные очаги, которые быстро увеличиваются в диаметре (число их постоянно). Оба режима очагового горения осуществляются одновременно в одном опыте.

Поступила в редакцию
2/II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Боден и А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидкокипящих веществах. ИЛ, 1955.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6, 131.

¹ Результаты опытов докладывались в ИХФ АН СССР в 1961 г.
