

Сборник статей по теории взрывчатых веществ

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
С23

С23 Сборник статей по теории взрывчатых веществ / – М.: Книга по Требованию, 2021. – 224 с.

ISBN 978-5-458-60553-3

Сборник включает ряд новых работ по теории горения взрывчатых веществ и по изучению термического разложения их. Наряду с этим сборник содержит статьи по действию газового взрыва на взрывчатые вещества, теории возбуждения взрыва ударом, методике применения катодного осциллографа для изучения взрывных явлений. Сборник предназначен для научных работников вузов, институтов и заводов, работающих в области взрывчатых веществ и студентов старших курсов спецфаков.

ISBN 978-5-458-60553-3

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Отсутствие у нас специального журнала по вопросам взрывчатых веществ и малая доступность иностранной литературы приводят к такому положению, когда многие весьма интересные работы, публикуемые в наших журналах и в заграничных периодических изданиях, доходят до читателя с большим опозданием или совсем остаются ему неизвестными. В особенности это относится к работам по теории взрывчатых веществ, ибо даже за границей лишь небольшая часть этих работ печатается в специальных журналах по взрывчатым веществам.

Наряду с этим работы, публикуемые в общефизических журналах, нередко по характеру изложения трудно доступны для читателя, не имеющего специальной подготовки в области физической химии.

По этим соображениям было целесообразным издание сборника по теории взрывчатых веществ, включающего ряд статей, частью написанных специально для него.

По содержанию статьи, вошедшие в сборник, можно разбить на три раздела.

К первому относится работа Беляева по действию теплового импульса на взрывчатые вещества, приведшая его к формулированию новой теории горения взрывчатых веществ, изложенной во второй статье этого же автора. В статье Андреева излагаются результаты экспериментального изучения горения ряда взрывчатых веществ.

Ко второму разделу принадлежит серия работ по термическому разложению твердых взрывчатых веществ; основные теоретические выводы из этих работ сформулированы в статье Андреева «О топочимическом разложении взрывчатых веществ». Сюда же относятся несколько экспериментальных и теоретических работ по вспышке взрывчатых веществ.

Наконец, третий раздел составляют работы, не так тесно связанные по содержанию. Это — работа Андреева и Маслова по ис-

следованию действия газового взрыва на взрывчатые вещества, статья Харитона, представляющая опыт построения тепловой теории возбуждения взрыва ударом, исследование Беляева о действии ударных волн в различных условиях и, наконец, статья Степанова, подводящая итоги длительной работы по методике применения катодного осциллографа для изучения взрывных явлений.

При небольшом объеме сборника в него могли быть включены только немногие из представляющих интерес работ по теории взрывчатых веществ.

В частности остались незатронутыми результаты сессии Фарадеевского общества в 1938 г. в части, посвященной детонации твердых взрывчатых веществ, и другие исследования.

А. Ф. Беляев

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой импульс является одним из видов начального импульса, применяемых для возбуждения детонации во взрывчатом веществе. При поджигании взрывчатого вещества пламенем, раскаленным телом и т. д. мы всегда имеем дело с тепловым импульсом, который сообщается с некоторой скоростью определенному объему взрывчатого вещества и вызывает его разложение.

Есть основания предполагать, что возникновение детонации под действием удара также в конечном итоге связано с воздействием на взрывчатое вещество теплового импульса. Таким образом на практике повседневно приходится встречаться с воздействием на взрывчатое вещество той или иной формы теплового импульса. Несмотря на это, общие закономерности теплового инициирования остаются неясными, и в литературе нет сколько-нибудь исчерпывающих исследований по этому вопросу.

Такое положение вещей и заставило нас исследовать вопрос о детонации взрывчатых веществ под действием теплового импульса с целью хотя бы несколько заполнить пробел, существующий в этой области.

Понятие теплового инициирования — очень общее понятие. При тепловом инициировании тепло может сообщаться самым различным объемам взрывчатого вещества с весьма различной скоростью и с различной продолжительностью воздействия. В настоящей работе исследовалось тепловое инициирование в том случае, когда тепло сообщалось сравнительно малым (до нескольких кубических микронов) объемам взрывчатого вещества, причем продолжительность теплового импульса не превышала 10^{-3} — 10^{-4} сек. Как раз этот случай теплового инициирования (малая продолжительность воздействия на малый объем) почти совершенно не исследован, хотя в то же время он представляет большой интерес, так как при применении малых объемов и малых времен можно достигнуть большой концентрации энергии и вызвать развитие детонации сравнительно малыми количествами энергии.

Ю. Б. Харитоном¹ показано, что при ударе по взрывчатому веществу (как жидкому, так и твердому) в нем должны возникнуть локальные разогревы с температурой до 1000°, охватывающие объем взрывчатого вещества порядка нескольких кубических микрон. Естественно связать возникновение детонации при ударе с появлением во взрывчатом веществе этих микроскопических разогревов. Это предположение, очевидно, получит прочное обоснование в том случае, если удастся показать, что возникновение во взрывчатом веществе указанного типа локальных разогревов, вызванных чисто тепловым импульсом, действительно будет вести к развитию детонации.

Некоторые данные по вопросу о воздействии на взрывчатые вещества микроскопических разогревов были получены при изучении передачи детонации в вакууме между кристаллами иниципирующих взрывчатых веществ². Было показано, что в этих условиях передача детонации осуществляется микроскопическими осколками, летящими от одного кристалла к другому. Размер этих осколков порядка одного кубического микрона, скорость порядка 2—3 км/сек.

Удар хотя бы одного такого осколка о поверхность кристалла вызывает детонацию последнего. При ударе, очевидно, вся кинетическая энергия осколка должна перейти в тепловую энергию, сконцентрированную в объеме того же порядка, как сам осколок. Факт возникновения детонации вследствие удара такого осколка, очевидно, указывает на возможность возникновения детонации вследствие микроскопического местного разогрева. Однако возникновение детонации в этом случае имеет место только у иниципирующих взрывчатых веществ. Кроме того, в этом случае имеет место опять-таки удар, хотя и микроскопический.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В настоящей работе для получения микроскопических местных разогревов были использованы тонкие платиновые проволоки, помещаемые во взрывчатое вещество и нагреваемые током конденсаторного разряда.

Конденсаторный разряд удобен в том отношении, что при помощи его можно получить выделение большой энергии за малый промежуток времени, причем время разряда задается характеристиками самого конденсатора (это время тем больше, чем больше емкость конденсатора и сопротивление цепи). Энергия конденсатора, емкостью c , заряженного до напряжения E , равна, как известно,

$$W = \frac{cE^2}{2}.$$

¹ Ю. Б. Харитон, К вопросу о детонации от удара. См. этот сборник, стр. 177.

² Беляев и Харитон, Ж. Э. Т. Ф., т. 6, вып. 8; т. 7, вып. 4.

Оставляя емкость (а следовательно, и время разряда) постоянной, можно регулировать энергию конденсатора, изменяя напряжение на его зажимах.

В свою очередь в качестве источника тепла, вызывающего местный разогрев, использовалась проволока (а не искра, например), потому что в случае разогрева проволоки ниже температуры ее плавления мы имеем дело с вполне определенным объемом, температура которого легко вычисляется, причем это вычисление становится особенно надежным в случае слабых, но быстрых импульсов. Схема установки показана на рис. 1, где *A* — конденсатор, *B* — проволока.

Размер употреблявшихся проволок и изготовление проволок толщиной 2—5 μ

Работа в основном велась с платиновой проволокой толщиной 2—5 μ . При вспомогательных и разведочных опытах в некоторых случаях применялась проволока толщиной до 100 μ из меди, железа, вольфрама и платины. Работа с проволокой толщиной 2—5 μ очень затруднительна, так как она рвется от малейшего прикосновения к ней; тем не менее эту проволоку нужно окружить взрывчатым веществом так, чтобы по всей длине проволоки между нею и взрывчатым веществом был хороший контакт. Это достигалось следующим устройством (рис. 2). К концам двух толстых медных проводников, укрепленных на деревянной палочке, прищипывалась натянута волластоновая проволока (серебряная проволока с платиновым сердечником). В нашем распоряжении был волластон производства Института химической физики с толщиной платинового сердечника в 2 μ и 5 μ . В парафиновом кубике, имевшем размеры того же порядка, как расстояние между медными проводниками, высверливалось отверстие диаметром 3 мм и такой же глубины. На парафиновый кубик накладывалась волластоновая проволока так, чтобы средняя часть ее как раз приходилась над отверстием. Через волластон осторожно пропускался слабый ток; проволока нагревалась и начинала втапливаться в парафин, опускаясь своей средней частью в отверстие. Когда до дна отверстия оставалось 1—1,5 мм, ток прекращался, и проволока застывала в таком положении. После

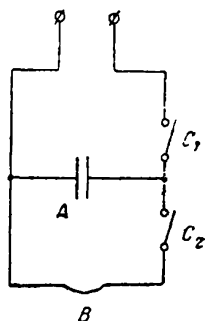


Рис. 1. Схема установки для получения микроскопических местных разогревов.

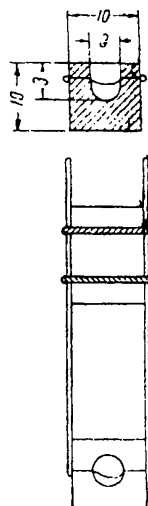


Рис. 2. Приспособление для опытов с тонкими проволоками.

этого в отверстие наливалось несколько капель 75%-ной азотной кислоты, которая, почти не действуя на парафин, растворяла серебро, и таким образом получалась тонкая платиновая нить, протянутая от одного края лунки к другому. Диаметр нити определялся диаметром платинового сердечника, длина была равна диаметру лунки (3 мм). Лунка промывалась от кислоты, высушивалась, и все устройство (далее оно будет для краткости называться элементом) было готово к производству опытов.

При опыте лунка заполнялась взрывчатым веществом, свободные концы медных проводников соединялись с источником тока, через элемент пропусклся электрический импульс и регистрировалось наличие или отсутствие детонации.

Приведем данные о массе и сопротивлении проволок, с которыми в основном велась работа.

1. Платиновая проволока толщиной 5 μ , длиной 3 мм с сопротивлением 12 Ω при массе $1,25 \cdot 10^{-6}$ г.

2. Платиновая проволока толщиной 2 μ , длиной 3 мм с сопротивлением 75 Ω при массе $2 \cdot 10^{-7}$ г.

Время нагрева и время остывания проволоки

Время нагрева проволоки при выбранной методике, очевидно, определялось временем разряда конденсатора. Можно с полным основанием считать, что в этих условиях разряд конденсатора практически прекращался через промежуток времени порядка 3—5 μ с, где τ — сопротивление проволоки и C — емкость конденсатора. Для различных емкостей и сопротивлений, с которыми производились опыты, время нагрева изменялось от 10^{-4} до 10^{-3} сек., т. е. время нагрева в большинстве случаев было настолько малым, что практически продолжительность теплового воздействия определялась не временем нагрева, а временем остывания этих микроскопических проволок. Время остывания было установлено экспериментальным путем научным сотрудником лаборатории Б. М. Степановым, который при помощи катодного осциллографа получил фотографии, показывающие время, прошедшее от начала разогрева до полного остывания проволоки. Это время меняется в зависимости от диаметра проволоки (2 или 5 μ), емкости и общего количества энергии в конденсаторе, однако даже при неблагоприятных условиях (проволока диаметром 5 μ и значительные емкость и энергия конденсатора) это время не превышало 10^{-3} сек. Фотографии Степанова убедительно показали возможность создания в микроскопических объемах взрывчатого вещества нагревов продолжительностью не выше 10^{-3} — 10^{-4} сек.

Вычисление максимальной температуры проволоки

Максимальную температуру проволоки можно вычислить, допустив, что процесс нагрева проволоки идет адиабатически и что вся энергия конденсатора выделяется в проволоке. Тогда максимальный разогрев проволоки будет

$$T_2 - T_1 = 0,24 \frac{cE^2}{2k\pi m}, \quad (1)$$

где c — емкость конденсатора,
 E — напряжение,
 k — удельная теплоемкость,
 m — масса проволоки.

Допущение о том, что процесс нагрева проволоки является адиабатическим, вполне обосновано, если принять во внимание ничтожную длительность разряда, при которой не успеет произойти сколько-нибудь заметного рассеивания энергии. Что касается второго допущения, то оно может быть обосновано тем, что сопротивление платиновой проволоки гораздо больше сопротивления всей остальной цепи и почти вся энергия конденсатора должна выделяться в проволоке; однако нужно учитывать возможности потери энергии в дуге, которая возникает при замыкании рубильника.

Необходимо отметить, что выражение (1) учитывает разогрев только самой проволоки. Очевидно, что когда проволока окружена взрывчатым веществом, часть энергии должна пойти на создание разогрева во взрывчатом веществе. Если считать, что объем взрывчатого вещества, на который распространяется разогрев от проволоки того же порядка, как и объем самой проволоки, то температура проволоки и прилегающего к ней объема взрывчатого вещества будет, примерно, вдвое меньше максимальной температуры, вычисленной в предположении, что энергия уходит только на нагрев проволоки.

Выбор объекта изучения

В качестве объекта изучения были приняты, как правило, жидкие взрывчатые вещества, так как в случае применения твердых мелкокристаллических веществ общая площадь контакта между кристаллами и проволокой, зависящая от размеров кристаллов и от плотности взрывчатого вещества, является весьма неопределенной, трудно учитываемой величиной. Из жидких взрывчатых веществ были выбраны высокочувствительный хлористый азот и сравнительно менее чувствительный нитроглицерин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

1-я серия. Хлористый азот

Результаты опытов с хлористым азотом представлены в табл. 1.

Таблица 1

d , μ	c , F	$E_{\min}$, V	$W_{\min}$, кал
5	10^{-5}	120	$1,7 \cdot 10^{-2}$
5	$5 \cdot 10^{-7}$	200	$2,4 \cdot 10^{-3}$
2	$5 \cdot 10^{-7}$	50	$1,5 \cdot 10^{-4}$
2	10^{-9}	500	$3 \cdot 10^{-5}$

Здесь d — диаметр проволоки в микронах,
 c — емкость конденсатора в фарадах,
 $E_{\min}$ — минимальное напряжение на зажимах конденсатора,
 при котором имеет место возникновение детонации, в вольтах,
 $W_{\min}$ — минимальная энергия, необходимая в данных условиях для развития детонации, в малых калориях

$$W_{\min} = 0,24 \frac{cE_{\min}^2}{2}.$$

Из данных табл. 1 видно, что уменьшение диаметра проволоки с 5 до 2 μ и, следовательно, уменьшение объема, на который распространяется тепловой импульс, позволяет уменьшить в несколько раз минимальную энергию, необходимую для развития детонации в хлористом азоте. Это обстоятельство носит тривиальный характер для достаточно больших объемов. Однако для весьма малых объемов уменьшение энергии, необходимой для развития детонации, при уменьшении объема, на который распространяется местный разогрев, не является тривиальным. При таких объемах чрезвычайно большое значение приобретает теплопроводность, быстро рассасывающая микроскопический местный разогрев. В конце концов, в случае некоторого весьма малого объема дальнейшее уменьшение его не должно приводить к уменьшению энергии и, таким образом, должно существовать некоторое абсолютное минимальное количество энергии, необходимое при данных внешних условиях для развития детонации. Опыты показывают, что в приведенных условиях в случае применения хлористого азота мы еще весьма далеки от этого минимального количества энергии.

Развитию детонации также благоприятствует уменьшение времени разряда и увеличение скорости выделения энергии. (Заметим, что последнее обстоятельство, по видимому, не связано с рассеянием энергии путем теплопроводности при более медленном процессе, и нагрев проволоки как при разряде емкости 10^{-9} F; так и при разряде емкости $5 \cdot 10^{-7}$ F должен быть адиабатическим. В обоих случаях заметное охлаждение будет иметь место только лишь после окончания разряда. По всей вероятности, влияние емкости связано с более быстрой подачей энергии в начале разряда).

Таким образом даже в случае тех ничтожных объемов хлористого азота, которые были применены в этой работе, совершенно отчетливо видно благоприятное влияние увеличения концентрации энергии (сосредоточения энергии в меньшем объеме). Это увеличение концентрации энергии приводит к уменьшению общего количества энергии, необходимого для развития детонации, и, следовательно, микроскопический разогрев, обладающий достаточно высокой температурой, должен приводить к детонации всей массы хлористого азота.

Однако нужно сразу же отметить, что в количественном отношении в смысле подтверждения гипотезы развития детонации при ударе от местных разогревов результаты опытов являются неудовле-

творительными. Самая минимальная энергия $3 \cdot 10^{-5}$ кал (провода 2 м, емкость 10^{-9} F) соответствует разогреву проволоки до температуры нескольких тысяч градусов, т. е. по существу имеет место плавление, а возможно и испарение, платиновой проволоки. Естественно, встает вопрос: если для развития детонации из местных разогревов объемом в несколько кубических микрон необходимы температуры в несколько тысяч градусов (в случае применения высокочувствительного хлористого азота), то какие же температуры в объемах указанного порядка необходимы для развития детонации в таких взрывчатых веществах, как нитроглицерин, тротил и т. д.

Кроме того, до сих пор предполагалось, что температура равномерно распределена по всей длине проволоки. Для температур ниже температуры плавления проволоки это предположение должно довольно близко отвечать действительности. Однако при температурах выше температуры плавления большая часть энергии может выделяться в одном месте (там, где это плавление начнется прежде всего), что приведет к еще большему подъему температуры в данной точке.

2-я серия. Нитроглицерин

При работе с нитроглицерином методика была оставлена прежней, только парафин был заменен воском, так как парафин растворяется в нитроглицерине. Напряжения и емкости того же порядка, какие применялись при опытах с хлористым азотом, не дали никаких результатов.

Увеличение напряжения также не дало результатов. При напряжении 4000 V и емкости $5 \cdot 10^{-7}$ F, энергия конденсатора составляла уже, примерно, 1 кал. Проволока в момент разряда буквально варывалась с сильным звуком, однако нитроглицерин не детонировал и не вспыхивал, частично разбрызгиваясь при взрыве проволоки. Вследствие этого была смонтирована установка для создания высоковольтного импульса большой мощности, схема которой показана на рис. 3.

Максимальное напряжение установки равнялось 40 000 V и емкость конденсатора была $5 \cdot 10^{-7}$ F, что соответствует энергии разряда порядка 100 кал. По данным Андерсона при разряде емкости $5 \cdot 10^{-7}$ F, заряженной до напряжения 30 000—35 000 V, на железную проволоку 0,1 мм последняя превращается в пар через 10^{-5} — 10^{-6} сек. от начала разряда; температура этого пара достигает 20 000°. Все явление протекает очень энергично и может быть с полным основанием названо «взрывом». Взрыв проволоки сопровождается резким звуком и производит вблизи себя значительное разрушительное действие. Толстостенный стеклянный капилляр, надетый на проволоку, в момент взрыва последней разлетался в мельчайшие

к высоковольтному
выпрямителю

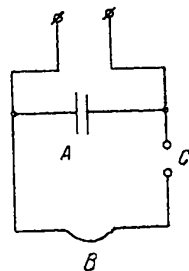


Рис. 3. Схема установки для создания высоковольтного импульса.

осколки. После варыва проволоки, лежавшей на куске дерева, на нем остается довольно глубокий след. Однако даже под действием такого мощного импульса, развивающего в довольно значительном объеме температуру порядка $20\,000^\circ$, нитроглицерин не детонировал и не вспыхивал.

Для полной ясности нужно сразу же отметить, что хотя при варыве проволоки и выделялось значительное количество энергии (100 кал), но скорость выделения энергии была намного меньше той скорости, с которой выделяется энергия при прохождении детонационной волны, или, другими словами, относительно медленный варыв проволоки не мог непосредственно создать ударную волну, которая, распространяясь по взрывчатому веществу, вызвала бы детонацию последнего. Непонятным является, однако, почему этот мощный разогрев не вызывает во взрывчатом веществе реакцию, которая, ускоряясь, привела бы к возникновению детонации?

Если, действительно, правильна гипотеза, связывающая развитие детонации при ударе с возникновением местных разогревов, то спрашивается, какого же порядка должны быть эти местные разогревы, если сравнительно объемистая проволока, нагретая до $20\,000^\circ\text{C}$ (причем выделение тепла в проволоке происходит со скоростями не меньшими, чем те скорости, с которыми развиваются местные разогревы при ударе), не вызывает детонации относительно чувствительного нитроглицерина?

Результаты опытов как с хлористым азотом, так и особенно с нитроглицерином заставляют прийти к выводу, что или неверна гипотеза, связывающая развитие детонации при ударе с возникновением местных разогревов, или что условия теплового инициирования при нашей методике не были идентичны тем, которые имеют место при ударе по взрывчатому веществу, и что, в частности, в условиях опыта существовала возможность поглощения энергии каким-то непредусмотренным путем.

О ВОЗМОЖНЫХ ПУТЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЛИ РАССЕИВАНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА

Рассмотрим подробнее воздействие теплового импульса на взрывчатое вещество. Если во взрывчатом веществе создать тем или иным путем местный разогрев, то в области, которую этот разогрев охватывает, должна возникнуть реакция, скорость которой будет зависеть от интенсивности этого местного разогрева. Тепло, выделяемое реакцией, приведет к дальнейшему повышению температуры, следовательно, к автоускорению реакции и в конечном итоге к развитию детонации. Таким образом, казалось бы, что всякий местный разогрев должен привести к возникновению детонации. Однако в действительности наряду с выделением тепла вследствие реакции существуют факторы, рассеивающие или поглощающие энергию, к которым в первую очередь следует отнести теплопроводность. Представим себе кристалл азота свинца, находящийся в печи, нагретой до 250° . При этой температуре в кристалле идет заметная