

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 2

1965

УДК 532.595.2+534.222.2

*B. E. Гордеев, A. И. Сербинов, Я. К. Трошин,
Г. И. Филатов*

ИНИЦИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ ПОСРЕДСТВОМ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Изучение процессов возбуждения детонации или горения конденсированных взрывчатых веществ газовой детонацией позволяет менять параметры инициирующего заряда и поэтому представляет интерес для выяснения физических условий в начальных стадиях развития взрывчатого превращения конденсированных ВВ. Впервые инициирование взрыва в жидким нитроглицерине детонацией в стехиометрической водородно-кислородной смеси исследовалось в работе [1].

В данной работе изучен процесс инициирования детонации в жидкой смеси тетранитрометана (ТНМ) с бензолом с помощью детонации стехиометрической метано-кислородной смеси.

Экспериментальная установка состояла из толстостенной стальной трубы (длина 110 см, наружный диаметр 76 мм) и прозрачной пlexiglasовой трубки (длина 300 мм, наружный диаметр 30 мм). Внутренний канал обеих труб (диаметр 10 мм) составлял одно целое, когда они перед опытом стягивались между собою (через резиновую прокладку) с помощью специальных фланцев. Верхний конец трубы закрывался стальной крышкой, в которой размещались электроды для зажигания и штуцер с отверстием для подачи газов. Plexiglasовая трубка наполнялась жидким (или твердым) ВВ и после того, как вся система продувалась метано-кислородной смесью, герметически соединялась со стальной трубой. В опытах с низким начальным давлением (в одну атмосферу и ниже) вся система после продувки заполнялась указанной выше горючей газовой смесью из шара-пилота. При более высоких давлениях метан смешивался с кислородом в самом канале над жидким ВВ. Для лучшего перемешивания газы подавались через расположенную в канале тонкую смесительную трубку (внутренний диаметр 2 мм) с отверстиями (0,5 мм) по всей ее длине (~ 100 см). Зажигание осуществлялось пережогом медной проволочки от электрической сети. Для ускорения перехода горения газообразной смеси в детонацию в стальную трубу вблизи источника зажигания вставлялась спираль из 20 витков проволоки диаметром 1 мм. Фоторегистрация процесса инициирования детонации в конденсированном ВВ производилась на дви-

жущуюся со скоростью 100 м/сек фотопленку, укрепленную на барабане. Начальное давление метано-кислородной смеси изменялось в пределах от 0,1 до 60 ата. Герметичность системы испытывалась статическим давлением (150 ата).

На рис. 1 показано взаимодействие детонационной волны, распространяющейся по стехиометрической метано-кислородной смеси, с поверхностью смеси ТНМ с бензолом, имевшей состав 1,5 : 1 по объему.

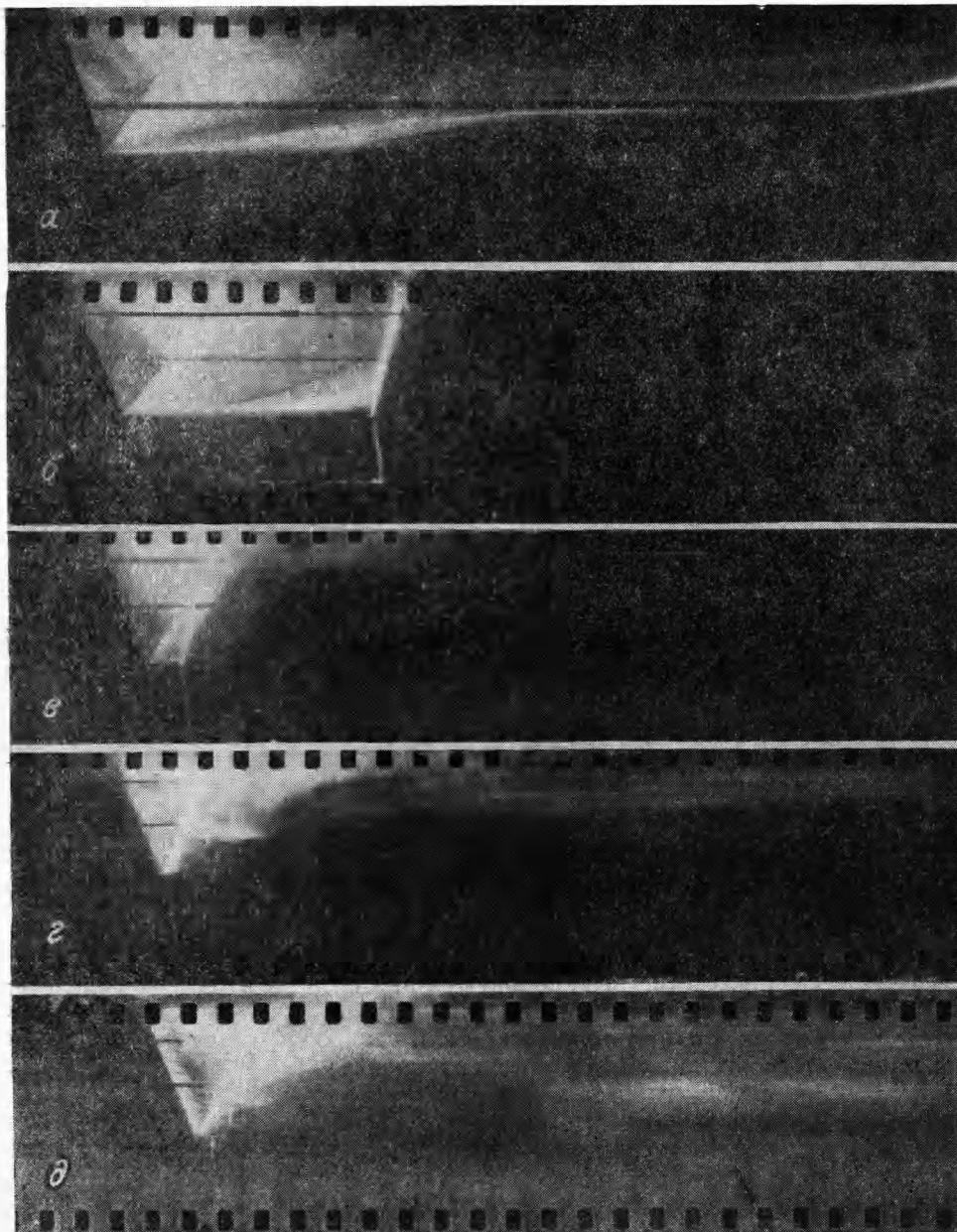


Рис. 1.

a — $p_0=1$ ата, $\tau=\infty$ (жидкое ВВ не зажглось); *б* — $p_0=2$ ата, $\tau \approx 330$ мксек; *в* — $p_0=4$ ата, $\tau \approx 40$ мксек; *г* — $p_0=12$ ата, $\tau \approx 10$ мксек; *д* — $p_0=24$ ата; без видимой задержки возникло ускоряющееся горение, перешедшее в детонацию.

На всех фотографиях видно распространение детонационной волны в газовой смеси, момент ее столкновения с поверхностью жидкого ВВ и отраженная волна, бегущая обратно по продуктам детонации газовой смеси. В правой части — после некоторой задержки τ (за исключением рис. 1, а, где конденсированное ВВ вообще не зажглось) — видно распространение детонации по жидкому ВВ. Оказалось, что детонация в этой жидкости возникала только при начальных давлениях газовой смеси $p_0 \geq 2$ ата.

С повышением начального давления p_0 газовой смеси от 2 до 12 ата величина задержки детонации в жидком ВВ уменьшается от 350 до 10 мксек (табл. 1). При $p=24$ ата (рис. 1, д) жидкость загорается

Таблица 1

Результаты опытов по инициированию смеси ТНМ с бензолом (1,5 : 1 по объему)

Начальное давление метано-кислородной смеси p_0 , ата	Скорость детонации в газовой смеси D_g , м/сек	Скорость детонации в жидком ВВ D_J , м/сек	Время задержки детонации в жидком ВВ τ , мксек
2	2260	—	Бесконечное
2	2260	6200	350
2	2260	6200	150
4	2280	6200	35
6	2300	6200	20
12	2350	6200	10
24	2400	6200	—
24	2400	6200	—

уменьшении, поэтому детонация метано-кислородной смеси кажется здесь «нормальной» (прямая линия фронта). Если же при прочих равных условиях пользоваться высокоскоростным фотoreгистратором без уменьшения и с большим временным разрешением, то детонация в этой смеси будет видна как пульсирующая с волнистой линией фронта [2, 3]. В пульсирующей детонации газ и в переднем изломанном ударном фронте и в неустойчивом фронте воспламенения неоднороден и по температуре и по давлению, причем линейный размер этих неоднородностей тем меньше, чем выше давление (p_0) исходной метано-кислородной смеси. Это обстоятельство нужно было бы учитывать при анализе процесса взаимодействия волны газовой детонации с жидким ВВ. Однако, имея в виду, что для небольших давлений ($p_0 < 20$ ата) задержки τ достаточно велики (см. табл. 1), можно полагать, что неоднородности температуры и давления быстро выравниваются при столкновении газовой детонационной волны с поверхностью жидкого ВВ. Поэтому в дальнейшем будем полагать, что при взаимодействии газовой детонационной волны с жидким ВВ оно приходит в соприкосновение с равномерно нагретыми продуктами реакции газовой детонации.

Стехиометрическая смесь тетранитрометана с бензолом (4 : 1 по объему) еще более чувствительна к воздействию газовой детонационной волны и детонирует уже при $p_0 \geq 0,66$ ата. При этом время задержки инициирования детонации в жидкой фазе (τ) составляет всего лишь 70 мксек. С увеличением начального давления газовой смеси τ уменьшается и при $p_0=6$ ата становится меньше разрешающей способности фотoreгистра. При увеличении начального давления до 60 ата поверхность жидкости зажигалась в момент соприкосновения с продуктами

в момент прихода газовой детонационной волны к поверхности жидкой фазы, т. е. задержка воспламенения жидкой фазы практически исчезает. Из рис. 1 видно, что возникшее в жидкости горение ускорялось и через 30 мксек перешло в детонацию.

При анализе фотографий, приведенных на рис. 1, следует учитывать, что они получены обычным фотoreгистратором с малым временным разрешением при сильном

газовой детонации. Возникшее горение вскоре (через ~ 20 мксек) переходило в детонацию.

Различные величины запаздывания инициирования детонации, приведенные в табл. 1 и 2, при контакте конденсированных ВВ с горячими продуктами детонации газовой смеси, по-видимому, обусловлены различной эффективной температурой поверхностного слоя конденсированного ВВ. Чтобы оценить значение указанной температуры, необходимо иметь данные по температурной зависимости запаздывания воспламенения (τ) для исследуемого взрывчатого вещества.

В работе [4] было показано, что температурная зависимость для сложных молекул ВВ описывается уравнением теплового взрыва Н. Н. Семенова [5] и О. М. Тодеса [6]:

$$\tau = A \cdot \exp(E/RT), \quad (1)$$

где E — энергия активации, T — абсолютная температура ВВ, R — газовая постоянная, A — константа, равная $10^{-14,6}$ сек.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов по определению величин τ при разных температурах смесей тетранитрометана с бензолом или гептаном при подаче этих смесей отдельными каплями в нагретую стеклянную пробирку, а также при нагревании навесок этих же смесей (~ 1 г) в запаянных стеклянных ампулах, помещавшихся для достижения равномерности температуры в термостатированый массивный медный блок. Чистый ТНМ испытывался только в запаянных стеклянных ампулах, поскольку отдельные капли в нагретой стеклянной пробирке воспламенялись нерегулярно. Из рис. 2 видно, что все результаты опытов в запаянных ампулах лежат между граничными прямыми, проведенными по уравнению (1) со значениями энергии активации $E=33$ ккал/моль и $E=35$ ккал/моль. Там же лежат и результаты опытов со смесями ТНМ с гептаном при подаче их отдельными каплями в нагретый стеклянный сосуд. Только при малых величинах запаздывания воспламенения ($\sim 1-3$ сек) опыты выходят из кинетической области, так как в этом случае при определении величины τ уже нельзя пренебречь временем прогрева капли. В кинетической области не лежат также и результаты опытов при подаче в нагретый стеклянный сосуд отдельных капель смесей ТНМ с бензолом. Причины отклонения этих смесей от общей закономерности пока точно не известны. Однако можно высказать некоторые общие соображения, касающиеся теплового взрыва смесевых ВВ.

Тепловой взрыв можно представить себе как первоначальное эндо-термическое мономолекулярное разложение наименее прочных молекул смеси с последующими бимолекулярными и цепными экзотермическими реакциями продуктов разложения (например, окислителя) с молекулами другого компонента (например, горючего). Обычно вследствие большой скорости вторичных экзотермических реакций время указанного суммарного процесса определяется более длительным первичным эндо-

Таблица 2

Результаты опытов по инициированию стехиометрической смеси ТНМ с бензолом (4 : 1 по объему)

Начальное давление газовой смеси P_0 , ата	Скорость детонации		Время задержки детонации в жидком ВВ τ , мксек
	в газовой смеси D_g , м/сек	в жидком ВВ D_j , м/сек	
0,4	2260	—	Бесконечное
0,66	2260	6850	70
1,0	2260	6850	40
3,0	2280	6850	10
6,0	2300	6850	5
60,0	2490	6850	—

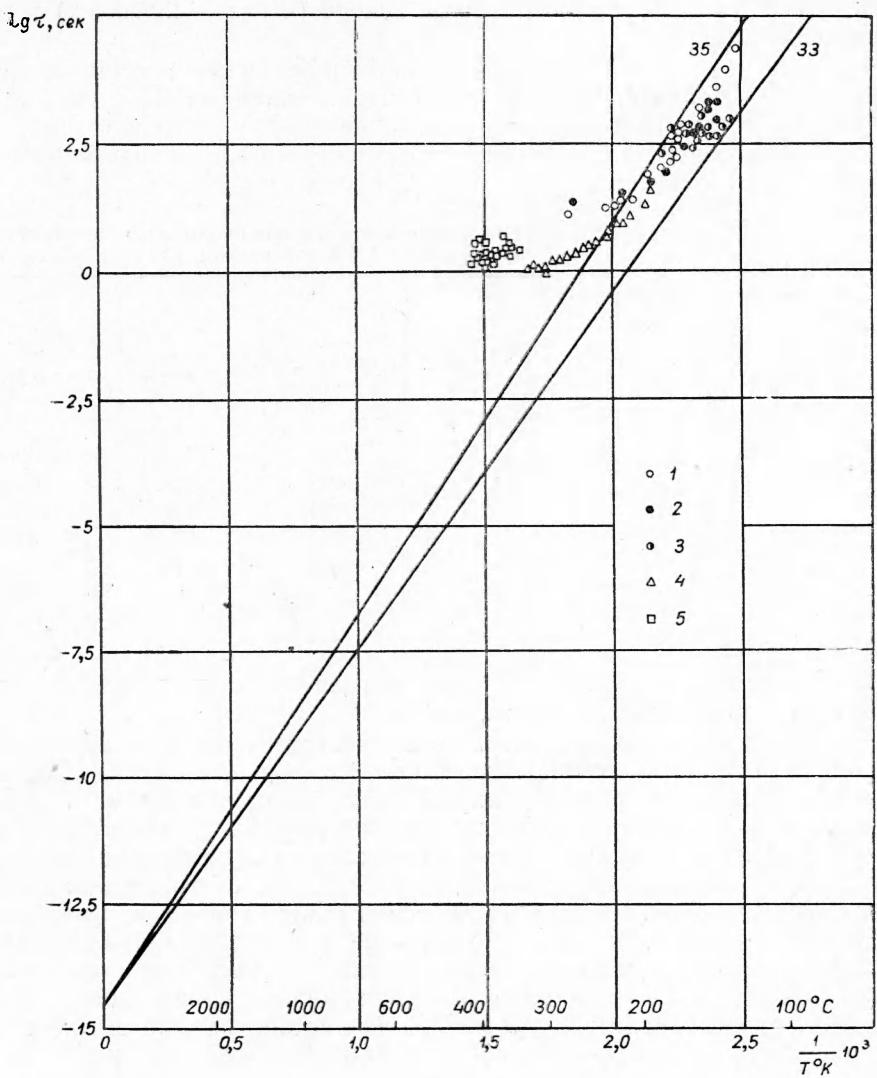


Рис. 2. График зависимости $\lg \tau$ от $\frac{1}{T}$ для термического разложения ТНМ и его смесей.

а — опыты в запаянных ампулах:
 1 — чистый ТНМ; 2 — смесь ТНМ с гептаном; 3 — смесь ТНМ с бензолом;
 б — опыты при подаче смеси отдельными каплями в нагретую стеклянную пробирку:
 4 — смесь ТНМ с гептаном; 5 — смесь ТНМ с бензолом.

термическим разложением исходных молекул. Возможно, что экзотермические реакции продуктов термического разложения ТНМ с молекулами бензола при низком давлении (в открытом сосуде) не протекают вслед за термическим разложением ТНМ с достаточной скоростью, и в этих условиях они начинают заметно влиять на суммарную скорость теплового взрыва. Но на основании всех опытов (за исключением упомянутого отклонения) можно считать, что энергия активации термического разложения ТНМ равна 34 ± 1 ккал/моль, поскольку экспериментальные точки, соответствующие величинам запаздывания воспламенения, не выходят за пределы граничных прямых со значениями $E =$

$=33$ ккал/моль и $E=35$ ккал/моль на протяжении четырех порядков изменения величины τ .

Подставляя в уравнение (1) величину энергии активации ($E=34$ ккал/моль) и решая его относительно T , получим:

$$T = 34000/[4,57(\lg \tau + 14,6)]. \quad (2)$$

Если предположить, что в описанных опытах (рис. 1) детонация жидкой фазы возникает как только слой не меньший, чем ширина зоны детонации жидкого ВВ, прогревается до эффективной температуры T , то по экспериментальным значениям τ можно, исходя из формулы (2), оценить эту температуру, приобретенную поверхностным слоем ВВ при контакте с горячими продуктами газовой детонации (табл. 3). Из табл. 3 видно, что эффективная температура поверхностного слоя конденсированного ВВ сравнительно невысока и при самых коротких измеренных значениях τ (~ 10 мксек) не превышает 500°C .

В поверхностном слое конденсированного ВВ при контакте с раскаленными продуктами взрыва газовой смеси существует некоторый профиль температуры, изменяющийся во времени. При этом наиболее высокая температура T_s достигается непосредственно в плоскости контакта. Решение задачи о возбуждении взрыва в конденсированном ВВ плоской накаленной поверхностью [7] приводит к приближенному выражению, позволяющему оценить значение T_s по измеренному τ

$$\tau = 0,21t_a\Theta_0^2, \quad (3)$$

где $\Theta_0 = E(T_0 - T_s)/(RT_s^2)$; $t_a = [(cRT_s^2)/(QEz)] \exp(E/RT_s)$ — адиабатическое время индукции взрыва; причем c — объемная теплоемкость ВВ, Q — тепловой эффект взрыва, $z=10^{13,6}$ сек $^{-1}$; T_0 — начальная температура ВВ. При этом в течение всего времени τ температура T_s сохраняет постоянное значение (табл. 4).

Таблица 3
Значения T , вычисленные по экспериментальным величинам τ

Состав смеси	Экспериментальные значения τ , мксек	Вычисленные значения T , $^{\circ}\text{K}$
Тетранитрометан с бензолом (1,5 : 1)	350	664
	150	690
	35	735
	20	750
	10	775
Тетранитрометан с бензолом (4 : 1)	70	715
	40	770
	10	775

Таблица 4
Значения T_s , вычисленные по измеренным значениям τ с помощью уравнения (3)

Состав смеси	Экспериментальные значения τ , мксек	Вычисленные значения T_s , $^{\circ}\text{K}$
Тетранитрометан с бензолом (1,5 : 1)	350	712
	150	740
	35	792
	20	811
	10	841
Тетранитрометан с бензолом (4 : 1)	70	758
	40	780
	10	832

Как и следовало ожидать, значения T_s несколько выше приведенных в табл. 3 значений эффективной температуры слоя. Хотя это преувеличение сравнительно невелико (в среднем на 80°), оно отвечает значениям τ , превосходящим соответствующие адиабатические времена индукции примерно в 40 раз.

Скорость детонационной волны в метано-кислородной смеси при начальных давлениях $p_0 < 60$ ата практически не зависит от начального давления и равна примерно 2300 м/сек. Температура T_2 смеси раскаленных продуктов детонации за фронтом волны при отражении от поверхности конденсированного ВВ в опытах также практически не могла зависеть от p_0 . Тем не менее увеличение p_0 всегда приводило к значительному уменьшению τ и соответствующему возрастанию T_s . Увеличение T_s не может быть объяснено только ударным нагревом конденсированного ВВ при отражении детонационной волны от его поверхности, так как давление в точке Жуге при распространении детонации в стехиометрической метано-кислородной смеси превышает p_0 в 28 раз, а при отражении от абсолютно жесткой преграды давление возрастает еще не более чем в 2,5 раза [8]. Таким образом, давление в ударной волне в жидким ВВ, возникающее при отражении газовой детонационной волны, не превышает $70 \cdot p_0$. Этого явно недостаточно, чтобы вызвать сколько-нибудь значительный разогрев жидкого ВВ.

Увеличение T_s при увеличении p_0 может быть удовлетворительно объяснено с помощью некоторых результатов теории теплопроводности [9]. Так например, решение задачи о тепловом контакте двух полу бесконечных стержней с теплоизолированными боковыми поверхностями, соприкасающихся торцами и нагретыми перед соприкосновением до температур T_0 и T_2 соответственно, приводит к следующему выражению для температуры T_s в плоскости контакта:

$$T_s = T_0 + (T_2 - T_0) / \left(1 + \sqrt{\frac{(\lambda_0 p_0 c_0)}{(\lambda_2 c_2 p_2)}} \right). \quad (4)$$

Здесь λ_0 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности; c_0 и c_2 — удельные теплоемкости и p_0 и p_2 — плотности веществ обоих стержней. Согласно формуле (4), температура T_s от времени не зависит.

Учитывая кратковременность задержек инициирования детонации в жидким ВВ, продукты детонации газовой смеси и жидкое ВВ в течение времени τ можно рассматривать как контактирующие полубесконечные стержни. Достаточно строгое рассмотрение процесса теплообмена между раскаленными продуктами детонации газовой смеси и жидким ВВ представляет собою весьма трудную задачу, так как в обеих средах идут химические реакции, а при этих условиях тепловой поток из газовой смеси в жидкость не подчиняется закону Фурье и поэтому не может быть выражен через теплопроводность. Кроме того, теплоемкость и теплопроводность газов сильно зависят от температуры и давления. Поэтому формула (4) в данном случае не может быть применена для количественных оценок величины T_s , но ее можно использовать для иллюстрации влияния начального давления p_0 газовой смеси на температуру T_s жидкого ВВ в плоскости контакта.

С увеличением p_0 плотность p_2 продуктов газовой детонации за отраженной волной будет увеличиваться, но влияние этого увеличения на T_s , соответствующее формуле (4) при постоянных значениях λ_2 и c_2 , будет в значительной мере компенсироваться одновременным уменьшением λ_2 и c_2 . Поэтому многократное увеличение p_0 приводит лишь к сравнительно небольшому возрастанию T_s . При давлениях $p_0 < 0,66$ ата для стехиометрической смеси ТНМ с бензолом и $p_0 < 2$ ата для смеси 1,5 : 1 (по объему) плотность p_2 горячих продуктов взрыва недостаточно велика для того, чтобы температура T_s на поверхности жидкого ВВ достигла необходимого для возникновения взрыва значения. В этих случаях условия теплообмена между смесью газов и жидкостью таковы, что продукты детонации остывают раньше, чем химическая реакция в

жидким ВВ успеет перейти во взрывную стадию, и температура T_s поверхности жидкого ВВ, установившаяся в момент контакта с продуктами газовой детонации, затем медленно уменьшается, задержка инициирования взрыва становится бесконечной (рис. 1, а).

Таким образом, повышение начального давления газовой смеси приводит к более высокому значению плотности продуктов детонации, вступающих в контакт с инициируемым конденсированным ВВ, и тем самым — к увеличению теплопередачи этому ВВ и повышению эффективной температуры его поверхностного слоя, которое вызывает сокращение задержки возникновения взрыва. Отсюда ясно, что источник инициирования детонации тем надежнее, чем выше температура продуктов его детонации T_2 , их объемная теплоемкость ($c_2\rho_2$) и теплопроводность (λ_2).

Полагая, что время химической реакции в стационарной детонационной волне конденсированного ВВ составляет величину порядка 10^{-7} — 10^{-8} сек, можно по формулам (2) и (3) оценить температуру поверхностного слоя конденсированного ВВ, необходимую для возникновения детонации (табл. 5).

Таблица 5
Эффективные значения температуры, рассчитанные по формуле (2)

Взрывчатые вещества	E , ккал/моль	T , °К при $\tau=10^{-7}$ сек	T , °К при $\tau=10^{-8}$ сек
Тринитротриазидобензол	30,5	878	1010
Стехиометрическая смесь ТНМ с бензолом .	34	978	1127
Нитроглицерин	35	1070	1160
Тетрил	38	1094	1260
Тротил	46	1325	1525

Из табл. 5 видно, что температуры с ростом энергии активации (E) несколько повышаются, оставаясь при этом намного ниже температуры продуктов детонации, контактирующих с поверхностью ВВ. Конечно, эти значения температур являются весьма приближенными, поскольку неизвестно, сохраняются ли закономерности (1) и (3) при столь коротких временах реакций, хотя для газовых смесей бензола с воздухом или кислородом закономерность (1) сохраняется вплоть до времени $\tau \sim 10^{-6}$ — 10^{-7} сек [11].

Можно попытаться провести также глубокую оценку температуры T_s и по формуле (4), используя имеющиеся в литературе данные о свойствах газов при высоких давлениях и температурах и полагая, что жидкое ВВ в течение времени τ ведет себя как инертная жидкость с постоянными значениями ρ_0 , c_0 и λ_0 .

Теплопроводность и теплоемкость газовой смеси, имеющей состав, продуктов взрыва стехиометрической метано-кислородной смеси ($\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O}$) при температурах в несколько тысяч градусов и давлениях в сотни и тысячи атмосфер, в настоящее время не известны.

Повышение температуры индивидуальных газов до 4000°К при атмосферном давлении приводит к увеличению λ и с примерно на порядок величины, а одновременное повышение давления до сотен атмосфер — к уменьшению этих величин в несколько раз [12—14]. Можно предположить, что в какой-то степени это справедливо и для газовых смесей.

Температуру T_2 продуктов детонации газовой смеси при отражении детонационной волны от поверхности жидкого ВВ можно приближенно оценить, полагая средний молекулярный вес продуктов детонации при

отражении аддитивной функцией средних молекулярных весов водяного пара и углекислого газа при давлениях до нескольких сот атмосфер и температуре до 5000°K [14, 15]. По результатам опытов со столкновением детонационных волн в газах было установлено, что при достаточно больших значениях p_0 отношение теплоемкостей c_p/c_v для продуктов взрыва стехиометрической метано-кислородной смеси равно 1,25. Этому значению соответствует увеличение плотности продуктов детонации при отражении от жесткой стенки в 3,7 раза по сравнению с начальной плотностью газовой смеси ($1,19 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$ при $p_0 = 1 \text{ ата}$). Согласно сделанной оценке, температура T_2 не превышает 4500°K . При этой температуре и давлении в несколько сотен атмосфер λ_2 и c_2 будут, вероятно, превосходить соответствующие значения этих величин при температуре около 1000°K и давлении в 100 ата лишь в 3—4 раза. Поэтому удельную теплоемкость газовой смеси состава $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ при 1000°K и давлении в 100 ата найдем как среднее значение удельных теплоемкостей углекислого газа и водяного пара [12, 13]. Соответствующие расчеты приводят к значению $c_p \approx 0,6 \text{ кал}/\text{г} \cdot \text{град}$. Увеличив этот результат в три раза, найдем предполагаемую удельную теплоемкость продуктов детонации при отражении: $c_2 = 2 \text{ кал}/\text{г} \cdot \text{град}$.

Коэффициент теплопроводности продуктов детонации будем считать близким к коэффициенту теплопроводности водяного пара [15]. Так, для водяного пара при $T = 1000^{\circ}\text{K}$ и $p = 100 \text{ ата}$, $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$, то, увеличив это значение в четыре раза, найдем предполагаемое значение коэффициента теплопроводности продуктов детонации при отражении: $\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$. Подставляя в формулу (4) значения $c_2 = 2 \text{ кал}/\text{г} \cdot \text{град}$ $\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$; $\rho_2 = 1,19 \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 \text{ г}/\text{см}^3$; $c_0 = 0,3 \text{ кал}/\text{г} \cdot \text{град}$; $\rho_0 = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$; $\lambda_0 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$; $T_0 = 290^{\circ}\text{K}$; $T_2 = 4500^{\circ}\text{K}$, находим $T_s \approx 800^{\circ}\text{K}$.

Таким образом, приближенная оценка по формуле (4) температуры T_s на поверхности жидкого ВВ при воздействии на нее газовой детонационной волны находится в удовлетворительном согласии с оценками, полученными другими способами.

Как уже отмечалось, при $p_0 > 20 \text{ ата}$ в момент соприкосновения продуктов реакции газовой детонационной волны с поверхностью жидкого ВВ в нем без измеримой задержки возникает ускоряющееся горение, переходящее в детонацию лишь через 20—30 мксек. Между тем при более низких начальных давлениях стадия ускоряющегося горения всегда отсутствовала.

Не связан ли этот интересный факт с двумя следующими обстоятельствами?

Во-первых, при более высоких давлениях (p_0) эффективная температура поверхностного слоя жидкого ВВ может быть заметно выше и вследствие увеличения теплопередачи от продуктов реакции и вследствие того, что сама средняя температура продуктов реакции (T_2), вступающих в контакт с жидким ВВ, несколько выше из-за большого количества малых по размеру газодинамических неоднородностей во фронте пульсирующей газовой детонации.

Во-вторых, по-видимому, ширина зоны нормального горения в жидком ВВ значительно меньше эффективной ширины зоны волны детонации в нем. В газах, например, для стехиометрической водородо-кислородной смеси при атмосферном давлении размер неоднородностей во фронте пульсирующей детонационной волны (пропорциональной ширине зоны детонации в модели Зельдовича — Неймана) более чем на порядок выше ширины зоны нормального пламени. Структура волны детонации в жидких ВВ оказывается тоже неоднородной [16, 17], по-видимому, и

здесь размер неоднородностей, а значит, и эффективная ширина зоны детонационной волны, значительно больше ширины зоны нормального горения. Поэтому можно предполагать, что при высоких начальных давлениях в очень тонком слое жидкого ВВ за неизмеримо короткое время достигается высокая температура, достаточная для его зажигания. Возникшее горение ускорится и через 20—30 мксек после прогрева жидкости до упомянутых ранее значений температуры ($800 \div 1000^\circ$ К) на глубину порядка ширины зоны детонации ускоряющееся горение переходит в детонацию.

При меньших давлениях (p_0) эти благоприятные условия быстрого поджигания ВВ исчезают: и условия теплопередачи, и средняя температура продуктов реакции (T_2) не достаточны для того, чтобы произошло быстрое нагревание тонкого слоя жидкого ВВ и возникло ускоряющееся горение. Однако и теплопередача и средняя температура T_2 остаются все еще достаточно высокими, чтобы за сравнительно длительный промежуток времени τ успел прогреться до необходимой температуры достаточно толстый слой жидкого ВВ, после чего в нем возможно возникновение детонации без стадии ускоряющегося горения.

Поступила в редакцию
30/XI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Харитон, Е. В. Рдултовская. Докл. АН СССР, 1939, 23, 6.
2. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 110.
3. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
4. А. И. Сербинов. Докл. АН СССР, 1959, 129, 627.
5. Н. Н. Семенов. Цепные реакции. А. 1934.
6. О. М. Годес. ЖФХ, 1939, 13, 868.
7. В. Н. Вилюнов, О. Б. Сидонский. Докл. АН СССР, 1963, 152, 131.
8. К. П. Станюкович. Докл. АН СССР, 1946, 52, 777.
9. А. В. Лыков. Теория теплопроводности, ГИТГЛ, 1952.
10. А. И. Сербинов. ЖФХ, 1959, 33, 2641.
11. А. И. Сербинов, Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. Докл. АН СССР, 1962, 145, 1314.
12. I. T. Vanderslice, S. Weisman, E. A. Mason, R. S. Fallon. Phys. of Fluids, 1961, 5, 2.
13. В. В. Рыбаков. Теплофизика высоких температур, 1963, 64, 1.
14. А. С. Плещанов, С. Г. Зайцев. Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика, газы высоких температур. М., Изд-во АН СССР, 15, 1962.
15. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическими свойствам газов и жидкостей. Физматгиз, 1963.
16. А. Н. Дремин, Г. А. Ададуров, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1960, 133, 1372.
17. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1960, 139, 137.