

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

К. К. АНДРЕЕВ

**О ГОРЕНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПОД ВОЗРАСТАЮЩИМ ДАВЛЕНИЕМ**

(Представлено академиком А. А. Скочинским 10 VIII 1940)

Исследования автора (1, 2) показали, что многие взрывчатые вещества способны к горению даже при атмосферном давлении. Это горение идет стационарно с малыми скоростями порядка сантиметров в минуту. Скорость горения, не зависящая от диаметра трубки, линейно возрастает в изученном интервале (до 1600 мм Hg) с давлением и слабо растет также с температурой. Для порошков линейная скорость горения увеличивается при уменьшении плотности. Для изученных взрывчатых веществ наблюдаются минимальные значения диаметра, давления, температуры и кубической плотности, ниже которых горение не распространяется, взаимно связанные и, повидимому, в значительной мере определяемые условиями теплообмена с окружающей средой.

Ни одно из изученных вторичных взрывчатых веществ (нитроглицоль, гремучий студень, желатинированный нитроглицерин 97:3, желатин-динамит 62%, тротил, пикриновая кислота, тетрил и гексоген) не дало при постоянном давлении перехода горения в детонацию.

Существенно отличную картину дали опыты горения под возрастающим давлением газообразных продуктов его.

Для этих опытов применялись железные трубки ( $l \approx 20$  см,  $d = 4$  см,  $s = 0,4$  см) с приваренным дном и навинтной головкой. Головка имела очко диаметром 3 см, закрывавшееся стальным или свинцовым диском, в последнем случае с асбестовой прокладкой. Часть трубки заливалась гипсом, поверх которого помещалось взрывчатое вещество, воспламенявшееся шашкой зажигательного состава (2 г). Характеристикой режима разложения взрывчатых веществ служило разрушение трубки.

Опыты дали три типичных вида разрушения трубки:

а) При свинцовом диске последний срезается нарастающим давлением газов, трубка остается целой; при прочном (10 мм) стальном диске имеет место разрыв трубки, причем, как правило, получают три части—головка, дно и средняя часть, разорванная по образующей и развернутая; процесс разложения взрывчатого вещества, соответствующий такой картине разрушения, представляет, очевидно, горение.

б) Несмотря на то, что свинцовый диск срезается, трубка не остается целой, но разрывается на сравнительно небольшое, порядка 10, число кусков, причем эти куски в значительной части—продолговатой формы, соответственно разрывам параллельно оси трубки. Такие же крупные куски получают и при стальном диске. Процесс разложения, соответствующий характеру разрыва трубки, мы будем называть взрывом.

в) При стальном или при свинцовом диске помимо гораздо большего, чем в предыдущем случае, числа крупных кусков, не имеющих теперь

продолговатой формы, получается значительное количество (зависящее от бризантности) мелких кусков (весом между 1 и 2 г), а также много осколков еще меньших размеров. Такое дробление трубки наблюдается при детонации взрывчатого вещества.

Опыты показали, что взрывчатые вещества по их поведению при зажигании в закрытой трубке можно разделить на 2 основные группы. К 1-й относятся непористые взрывчатые вещества (помимо полностью желатинированных порохов): гремучий студень, 62%-ный желатин-динамит и др.

Взрывчатые вещества этой группы вплоть до изученного предела давления (500—700 кг/см<sup>2</sup>) только горят. Это наблюдается для гремучего студня (93:7) при свинцовом 8-мм (210 кг/см<sup>2</sup>)\* или стальном (500—700 кг/см<sup>2</sup>) диске и заряде 50 г ( $\Delta \approx 0,4$ ), равно как и при большем заряде (200 г) и большей плотности заряжания ( $\Delta \approx 1,2$ ). Так же обстоит дело и с 62%-ным натровым желатин-динамитом (стальной диск), при котором, однако, деформация при 200-г зарядах несколько больше для части трубки, соответствующей концу заряда. То, что поведение динамитов не связано специфически с их коллоидной структурой, показывают опыты со смесью 75% нитроглицерина и 25% тонкоизмельченного кизельгура, имеющей мазеобразную консистенцию и ведущей себя так же, как гремучий студень.

Ко второй группе следует отнести взрывчатые вещества пористой структуры, в первую очередь порошкообразные взрывчатые вещества. Типичными представителями этой группы являются порошкообразные тэн и гексоген. Для этих веществ только при свинцовом диске толщиной 1 мм имеет место горение, приводящее к вырыванию диска без какой-либо деформации трубки. Уже при толщине диска 1,6 мм, а тем более при дисках в 2,5; 5 и 8 мм происходит детонация с сильным дроблением трубки на 25—40 крупных кусков, такое же число кусков средним весом 1—2 г и около 100 г более мелких осколков.

Более мягкое действие дают тетрил и пикриновая кислота.

Крайнее положение занимает кристаллический тротил, при 50-г заряде (стальной диск) дающий всего 3 куска; только при 150 г разрыв происходит с большим числом кусков: 5 в одном и 13 в другом опыте. Увеличение веса заряда, а вместе с тем и  $\Delta$  несколько повышает дробление трубки.

Расплавленный тротил (100°), равно как и литый ведут себя в общем аналогично веществам первой группы. Совершенно иную картину показывает тротил с азотной кислотой; не только жидкая смесь с содержанием 40% азотной кислоты, но и твердая смесь в литом виде с 10% азотной кислоты дает при стальном диске детонацию.

Поведение прессованных взрывчатых веществ существенно отличается от поведения тех же веществ в порошкообразном виде при малой кубической плотности. Тогда как тэн в виде порошка детонирует, как упоминалось, уже при свинцовом диске толщиной 1,6 мм, прессованный тэн ( $\delta = 1,65$ ) при толщине диска 2,5 и 8 мм, дает только вырывание диска без нарушения целостности трубки и лишь при стальном диске в 2 из 3 опытов наблюдалась детонация. Гексоген ( $\delta = 1,65$ ) ведет себя аналогично тэну; при свинцовом диске (2,5 мм) трубка остается целой, при диске 8 мм и стальном диске наблюдается умеренное дробление на продолговатые куски (8—13). Тетрил ( $\delta = 1,5$ ) при 8-мм свинцовом и даже при стальном диске дает только 3—4 куска, т. е. картину разрыва трубки.

\* Давления, срезывающие свинцовые диски или разрывающие трубку при толщине стальном диске, определялись сжиганием в трубке пороха с крешерным приборчиком. При толщине свинца в 1; 1,6; 2,5 и 8 мм эти давления составляют соответственно ~25, 45, 65 и 210 кг/см<sup>2</sup>, разрыв трубки имеет место при 500—700 кг/см<sup>2</sup>.

Описанные явления невольно побуждают к сопоставлению их с хорошо известным явлением перепрессования гремучей ртути. Были поставлены поэтому опыты также в этом направлении. Гремучая ртуть (1 г) запрессовывалась в латунную гильзу капсюля-детонатора № 8 под давлением 5 000 кг/см<sup>2</sup>. Испытание на свинцовых пластинках показало, что капсюли, прессованные при 5 000 кг/см<sup>2</sup>, хотя и дают хлопок, но гильза остается целой или только разворачивается, и на пластинке, кроме слабого в некоторых случаях отпечатка доньшка капсюля, не остается никаких других следов действия. При опытах в открытой трубке или под слабым давлением также происходит только выгорание гремучей ртути. Напротив, в трубке, закрытой стальным диском, под давлением продуктов горения небольшого заряда пороха гремучая ртуть взрывает с соответствующим отпечатком на свинцовой пластинке и разрывом нижней части гильзы на мелкие куски.

Какие же более общие выводы позволяют сделать наблюдавшиеся факты? Прежде всего они показывают, что термический импульс способен вызывать не только горение взрывчатого вещества, как это имеет место при малых и постоянных давлениях, но и его детонацию подобно тому, как ее вызывает капсюль-детонатор. Это обстоятельство дает некоторое указание на возможную близость механизмов, обоих видов импульса. Интересно в связи с этим отметить также, что, по крайней мере, порошкообразные взрывчатые вещества в отношении их «чувствительности» в условиях описанных опытов располагаются в той же последовательности (тэн, гексоген, тетрил, пикриновая кислота, тротил), в какой находится их чувствительность к удару.

Далее опыты показывают существование двух механизмов горения.

Первый из них заключается в горении последовательных слоев взрывчатого вещества и наблюдается для всех взрывчатых веществ, в том числе и порошкообразных, при постоянном давлении и малой скорости горения, а для плотных непористых веществ и в условиях возрастающего давления.

Для пористых, в частности, порошкообразных, взрывчатых веществ при возрастающем, а также высоком постоянном внешнем давлении площадь фронта горения во много раз превышает площадь сечения заряда, по которому он горит, в результате проникновения газообразных продуктов горения в поры между частицами взрывчатого вещества, ведущего к зажиганию этих частиц.

В соответствии с различием механизма горения различается и механизм перехода горения в детонацию в обоих случаях. Вообще, повидимому, этот переход может иметь место по достижении какой-то критической скорости горения\*, которая в наших условиях получается при создании во фронте горения определенного критического давления. При непористых взрывчатых веществах с малой скоростью горения величина давления во фронте горения зависит в первую очередь от прочности оболочки, в которой заключено взрывчатое вещество. Поэтому переход горения в детонацию для таких взрывчатых веществ может произойти лишь при прочности оболочки, близкой к соответствующей критическому давлению. При пористых взрывчатых веществах, напротив, за счет большой поверхности горения и соответствующей ей большой скорости газообразования может во фронте создаться значительное местное повышение давле-

\* Вопрос о том, почему при критической скорости горения оно переходит в детонацию, выходит за рамки данной статьи. Отметим лишь, что возникновение детонации можно представить себе и в духе гидродинамической теории, и как возникновение фронта бесконечных цепей [Trans. Far. Soc., 31, 797 (1935); ДАН, XXV, 195 (1939)]. При этом, в противоположность мнению некоторых авторов, нам кажется, что между обеими точками зрения нет принципиального различия.

ния, при определенных условиях достигающее критического. Поэтому переход горения в детонацию может для них иметь место даже при сравнительно малой прочности оболочки.

При недостаточной скорости горения критическое давление может и не быть достигнуто. Если, однако, давление достаточно велико для обеспечения такой скорости газообразования, чтобы, несмотря на вырывание свинцового диска, давление во фронте горения не падало, то процесс идет настолько быстро, что трубка не просто разворачивается по линии наименьшего сопротивления, но разрывается на некоторое число кусков. Такой вид распространения взрывного превращения, когда давление во фронте автоматически поддерживается за счет достаточно большой скорости газообразования, но не достигает критического, мы называем взрывом.

При изученных вторичных взрывчатых веществах с их малой скоростью горения такой режим, а тем более детонация могут быть получены только при довольно прочной оболочке даже при порошках малой плотности. Можно представить себе, однако, взрывчатое вещество с большой скоростью горения, для которого режим взрыва и возникновение детонации могут осуществляться даже при горении в отсутствии замкнутой оболочки. Повидимому, таким взрывчатым веществом и является гремучая ртуть, скорость горения которой на несколько порядков больше скорости горения вторичных взрывчатых веществ<sup>(3)</sup>, а также, вероятно, и вообще инициирующие взрывчатые вещества. Очевидно, что повышение кубической плотности, другими словами, уменьшение промежутков между кристаллами, должно затруднять возникновение детонационного режима и в этом случае, что и наблюдается для гремучей ртути с ростом плотности так же, как и для гексогена при переходе от плотности 0,75—1,10 к плотности 1,65. Далее, исходя из изложенного механизма явления, следует ожидать, что при горении под повышенным давлением перепрессованная гремучая ртуть должна детонировать в результате роста количества проникающих между частицами газов и—при некотором значении давления—превышения критического давления. Опыт, как мы видели выше, подтвердил это предположение.

С условиями проникновения газообразных продуктов реакции в пористую массу связана, повидимому, и зависимость между чувствительностью к детонации и кубической плотностью взрывчатых веществ, по крайней мере, смесей типа аммонитов. В последнем случае роль горячих газов для подготовки гомогенной среды, способной к детонации, является особенно существенной, так как трудно представить себе быструю реакцию на относительно малой поверхности контакта твердых компонентов. С затруднением такой подготовки связана, повидимому, и утрата способности к детонации при перепрессовании смесей сверх критической плотности.

Способность порошкообразных аммонитов детонировать при действии термического импульса<sup>(2)</sup>, а также далеко идущий параллелизм между чувствительностью к термическому импульсу и к капсулю-детонатору подтверждают эти соображения.

Московский химико-технологический институт  
им. Д. И. Менделеева

Поступило  
13 VIII 1940

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> ДАН, I, 220 (1935). <sup>2</sup> Сборник статей по теории взрывчатых веществ, стр. 39 (1940). <sup>3</sup> Sow. Phys., 1, 190 (1933); Bull. Soc. chim. de France [5] 2, 2128 (1935).