

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. М. Саммерфилд. В сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963.
3. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.
4. Г. Г. Шелухин, В. О. Юдин. Техника кино и телевидения, 1967, 6.
5. Г. Г. Шелухин, В. О. Юдин. Теплофизика высоких температур, 1967, 4, 5, 928.
6. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», 1953, № 2.

УДК 536.46

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. Н. Кондриков

(Москва)

Существование особого типа неустойчивости горения взрывчатых веществ (ВВ), связанной с тепловой инерционностью прогретого слоя конденсированной фазы, было предсказано в работе [1]. В первоначальном варианте теории рассматривалось неустойчивое горение ВВ или пороха, эндотермически газифицирующихся с поверхности под действием потока тепла, передающегося теплопроводностью из зоны реакции в газовой фазе. Некоторые выводы работы [1] представлялись необычными и требовали экспериментальной проверки. Отметим из них следующие: 1) горение затухает, если начальная температура ВВ ниже некоторой критической; 2) критический диаметр горения конденсированных ВВ зависит от начальной температуры сильнее, чем у газов, стремясь к бесконечности при приближении к критической температуре; 3) скорость горения при диаметре, равном критическому, меньше отличается от адиабатической, чем теоретическая предельная скорость горения газов. При критической начальной температуре две первые скорости совпадают; 4) при повышении начального давления критический диаметр горения может не только уменьшаться, но и возрастать. Существует некоторое критическое давление, выше которого горение невозможно.

В работе [2] было показано, что при горении баллиститного пороха первое условие не выполняется. Для метилнитрата и нитрогликоля такого противоречия обнаружено не было. В ряде других экспериментальных работ, проведенных в этой области, были получены отдельные факты, которые можно было рассматривать как подтверждение теории, однако рассматривались они иначе.

В настоящей работе предпринята попытка сравнить выводы теории Я. Б. Зельдовича [1] с опытом на примере некоторых вторичных ВВ.

1. Критическая начальная температура ВВ, ниже которой его горение без обмена теплом с окружающей средой неустойчиво, определяется из соотношения

$$k = \beta (T_k - T_0^*) = 1, \quad (1)$$

где k — критерий Зельдовича; $\beta = \frac{d \ln m}{d T_0}$ — температурный коэффициент

ент скорости горения; T_k — температура поверхности конденсированной фазы (для относительно легколетучих ВВ — температура кипения); T_0^* — критическая начальная температура, в случае плавящихся ВВ включающая величину $Q_{пл}/c_k$ ($Q_{пл}$ — скрытая теплота плавления ВВ, c_k — теплоемкость конденсированной фазы). Проверим справедливость уравнения (1) на примере наиболее изученных в этом отношении нитроэфиров.

Зависимости скорости горения ряда нитроэфиров от начальной температуры имеются в монографии К. К. Андреева [3]. Значения β , полученные по этим данным построением прямых в координатах $T_0 - \lg m$, приведены в табл. 1¹. Величина β для тэна при атмосферном давлении экстраполирована из данных [3, 4] для более высоких давлений. Значение β для нитрогликоля получено из опытов по горению его в трубках из кварцевого стекла, погруженных в воду (при 100° — в смесь воды с глицерином). Для расчета β использовались скорости горения при таком диаметре трубки, когда скорость переставала зависеть от диаметра [5]. В таблице указан также температурный интервал, при котором зависимость $\lg m(T_0)$ линейна, а величина β постоянна. Точность приведенных в таблице значений β около 10%.

Таблица 1

Данные для оценки устойчивости горения нитроэфиров при атмосферном давлении

Нитроэфир	Интервал температур, °С	$\beta, \frac{1}{град} \cdot 10^3$	$T_k, °С$	$\beta (T_k - 20)$	T_0^* (округленно)
Метилнитрат . . .	0—53	7,4	66	0,34	—70
Нитрогликоль . .	20—100	5,0	200	0,90	0
Нитроглицерин* .	0—80	5,6	250	1,29	+70
Дигликольдинитрат	20—95	5,8	214	1,13	+40
Тэн**	—	6	270	1,5	+140
Коллоксилин . . .	(0—100)	8,4	~290	2,26	+170

Примечание. Температура поверхности дигликольдинитрата рассчитана по [8], нитроглицерин — взята из работы [10], остальных ВВ — из [11].

* β для желатинированного нитроглицерина.
 ** $Q_{пл}/c_k = 44 \text{ 1/град}$ [2].

Из табл. 1 следует, что горение рассматриваемых нитроэфиров при комнатной температуре и атмосферном давлении устойчиво в случае метилнитрата и нитрогликоля и неустойчиво в случае нитроглицерина, дигликольдинитрата, тэна и коллоксилина. Опыт показывает, что метилнитрат и нитрогликоль [3, 5] действительно горят при этих условиях вполне устойчиво.

Дигликольдинитрат [3] при 20° горел в стеклянной трубке диаметром 8 мм, находящейся на воздухе, с очень малой (0,15 мм/сек) скоростью. В работе [5] было показано, что в этих условиях велика роль теплоподвода по стенке трубки, существенно облегчающего горение и увеличивающего его скорость². В связи с этим были проведены опыты

¹ Для коллоксилина в координатах $T_0 - \lg m$ получается кривая, отчетливо дающая увеличение β при повышении начальной температуры. В таблице приведена средняя в данном температурном интервале величина.

² Так, при 20° критический диаметр горения нитрогликоля в конической кварцевой трубке на воздухе — 1 мм, в трубке, погруженной в воду, — 13—18 мм. Скорость горения в первом случае может быть на 20—30% выше адиабатической.

с дигликольдинитратом в кварцевой трубке внутренним диаметром 26 мм (толщина стенок 2 мм), погруженной в воду (20°). При многократном (10—15 раз) поджигании нагретой до светло-красного каления плоской спиралью из толстой нихромовой проволоки появлялось пламя, которое исчезало сразу же после удаления спирали. В трубках большего диаметра опыты не проводились: в лабораторных условиях сделать это трудно. Однако и полученный результат позволяет утверждать, что горение дигликольдинитрата при атмосферном давлении и комнатной температуре находится либо за пределом устойчивости, либо вблизи от него.

Не удалось также получить устойчивого горения тэна. В стеклянных трубках и стаканчиках диаметром 3—4 см тэн при поджигании спиралью из нихромовой проволоки загорался, но после удаления спирали толстый слой расплава, образовавшийся в результате нагревания, быстро уменьшался и горение затухало. Если спираль не убиралась, она, несмотря на разомкнутую цепь, оставалась в центральной части стаканчика светло-красной и горение продолжалось¹. По-видимому, именно таким образом обстоит дело в опытах по горению тэна [6], проводившихся без погружения трубки в воду и удаления поджигающей спирали.

Нитроглицерин, по данным [7], к горению при атмосферном давлении не способен. Значительно позже [8] удалось получить его горение, медленно повышая давление от 300—400 мм рт. ст., когда нитроглицерин легко воспламеняется обычным образом, до 600—1000 мм рт. ст. Трубка с нитроглицерином при этом в воду не погружалась, можно полагать, что и в этом случае существенную роль играл подвод тепла по стенке трубки.

Таким образом, горение дигликольдинитрата, тэна и нитроглицерина при атмосферном давлении и комнатной температуре весьма неустойчиво и способно к распространению, по-видимому, только в том случае, если имеется дополнительный источник тепла.

Такой источник, несомненно, имеется в случае нитроклетчатки, при горении которой в виде пироксилинового пороха, согласно [10], выделяется в конденсированной фазе около 100 кал/г. Вполне понятно, что теория неустойчивости горения в ее первоначальном варианте к этому случаю неприменима. Для оценки устойчивости горения коллоксилина можно воспользоваться, например, выражением, примененным в работе [12]:

$$\frac{\beta (T_k - T_0)}{\frac{c_g}{c_k} + \beta \frac{Q_k}{c_k}} \leq 1, \quad (2)$$

где c_g — теплоемкость газа; Q_k — тепло, выделяющееся в конденсированной фазе.

Если принять для коллоксилина $Q_k = 80$ кал/г и $c_k = c_g = 0,4$ кал/г·град, то T_0^* окажется не 170° С, как это следует из табл. 1, а гораздо ниже, около —30° С. Если учесть к тому же, что при понижении начальной температуры величина β для нитроклетчатки сильно уменьшается, легко объяснить возможность ее горения и при более низких температурах.

Отметим, что в условиях, где осуществляется горение всех упоминавшихся выше жидких ВВ при атмосферном давлении, оно протекает без каких бы то ни было искажений горячей поверхности, при совершенно

¹ Горел тэн и при добавлении к нему небольших количеств сажи, а также SiO₂ и циануровой кислоты (критический диаметр горения 1—1,5 см).

гладком мениске жидкости и ровном (там, где оно наблюдается) фронте газового пламени¹. Этот факт, а также то обстоятельство, что при атмосферном давлении неустойчиво горят как быстрогорящий нитроглицерин, так и медленногорящий диглицольдинитрат, делают излишним привлечение для объяснения неустойчивости горения в рассматриваемых условиях гидродинамической теории [3, 13, 14].

Соответственно по-иному должно быть объяснено известное стабилизирующее влияние желатинизации на горение нитроглицерина при атмосферном или близком к нему давлении [3]. Можно предположить, что в начальной стадии горения нитроглицерин испаряется, подобно тому как наблюдалось это при горении желатинированного метилнитрата [15], поверхностный слой обогащается нитроклетчаткой и протекание в нем экзотермической реакции интенсифицируется. В результате устойчивость горения возрастает.

Разумеется, сказанное не затрагивает эффекта неустойчивости горения жидкостей по Ландау — Андрееву при более высоких давлениях и скорости горения, равно как и роли при этих условиях желатинизации жидкости.

Следует отметить также, что для горения нитроглицерина при атмосферном давлении выполняются оба критерия неустойчивости — тепловой и гидродинамический. Непосредственное наблюдение за поверхностью горящей жидкости позволяет отдать предпочтение первому, а при повышенных давлениях основную роль, по-видимому, играет второй.

Анализ поведения других ВВ осложнен недостаточностью сведений по тепловыделению в конденсированной фазе и температуре поверхности. Немногочисленные данные, которые имеются, подтверждают рассматриваемую точку зрения. Так, критерию устойчивости (1) не удовлетворяют при атмосферном давлении тетрил и гексоген. Для первого значительное тепловыделение в конденсированной фазе обнаружено экспериментально [16], для второго — его дает расчет [17]. Учет этих количеств тепла полностью объясняет наблюдаемую на опыте устойчивость горения обоих ВВ. Расчет показывает также, что при обычных условиях неспособен к горению тротил (критическая температура для него выше 80°С). В наших опытах тротил не горел в погруженной в силиконовую жидкость трубке даже при 100°С.

Хорошо известно, что многие ВВ обладают очень малой способностью к горению, и в обычных для лабораторных испытаний количествах устойчиво не горят. Это относится к гексанитроманниту, стифниновой и пикриновой кислотам, аммиачной селитре, амматолам, перхлорату аммония и некоторым быстрогорящим ВВ [17]. В ряде случаев при воспламенении этих веществ возникает интенсивная вспышка, заканчивающаяся потуханием. Общая картина процесса, а также высокая температура кипения всех перечисленных веществ, наводят на мысль о применимости теории неустойчивого горения [1] и в этих случаях.

2. Зависимость критического диаметра горения газов от начальной температуры определяется соотношением [19, 20]

$$d_{*0} = \frac{4\lambda \sqrt{e \beta \text{Nu} \Delta T}}{m_{\text{ал}} c}, \quad (3)$$

¹ Искажение поверхности жидкости возникает только в момент затухания, после того как исчезает свечение в газовой фазе; вероятно, оно является результатом втекания в трубку, находящуюся после затухания под некоторым разрежением, окружающего газа.

где β и c — коэффициенты теплопроводности и теплоемкости; Nu — критерий Нуссельта; ΔT — средняя разность температур между газом и стенкой; $m_{ад}$ — адиабатическая массовая скорость горения.

Для конденсированных ВВ учет инерционности прогретого слоя конденсированной фазы дает выражение:

$$d_* = \frac{4\lambda \sqrt{e \beta Nu \Delta T}}{cm_{ад} \sqrt{e^k (1-k)}}, \quad (4)$$

которое отличается от предыдущего множителя $a = \frac{1}{\sqrt{e^k (1-k)}}$, уве-

личивающимся (до бесконечности) по мере того, как начальная температура приближается к критической, а величина k к единице. Формула (4) получена по методу, предложенному в работе [1], в предположении, что определяющую роль играет отвод тепла от нагретого газа, а критерий Нуссельта не зависит от диаметра трубки¹.

Опыты для проверки этого соотношения проводились с нитрогликолем в конических трубках из кварцевого стекла, погруженных в воду (при 100° С — в смесь воды с глицерином). Толщина стенок 1 мм, длина ~ 10 см, угол при вершине 5—8°. Воспламенение осуществлялось нагреваемой электрическим током нихромовой проволокой (рис. 1). При расчетах принято: $c=0,34$ кал/г·град; $\lambda=2 \cdot 10^{-4}$ кал/см·сек·град [3]; $Nu=8$ [20]; $T=200^\circ$ С [11]; $\Delta T=1000^\circ$ [22]; $\beta=5,0 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹. Легко видеть, что зависимость критического диаметра горения нитрогликоля от начальной температуры достаточно удовлетворительно описывается кривой $d_*(T_0)$, проведенной по формуле, учитывающей инерционность прогретого слоя конденсированной фазы.

Формула (3) дает результаты, близкие к получающимся на опыте только при достаточно высокой температуре, когда величины k и a малы. Следует отметить, что условия теплообмена при горении ВВ в стеклянных трубках не очень определены: теплопроводность стенки мала и на внутренней поверхности ее температура существенно отличается от температуры окружающей среды. При горении в тонкостенной латунной трубке критический диаметр нитрогликоля выше.

Существенно также, что в том случае, когда (например, в результате значительного тепловыделения в ж-фазе), процесс не описывается схемой, развитой в работе [1], критический диаметр горения может зависеть от начальной температуры гораздо слабее. На рис. 2 представлена зависимость $d_*(T_0)$ для литого тетрила при атмосферном давлении (методика проведения опытов та же, что для нитрогликоля). Для того чтобы уменьшить влияние турбулизации слоя расплава [5], опыты проводились также со смесью тетрила с 10% газовой сажи. Зависимость критического диаметра горения от начальной температуры очень мала, приближенно соответствует зависимости скорости горения от температуры².

3. Важный вывод теории горения газов [19, 20] заключается в том, что за счет потерь во внешнюю среду скорость горения может умень-

¹ Если учесть зависимость $Nu(d)$, например, с помощью формулы Левека [21], выражение для критического диаметра горения будет $d_*' = \frac{9,60 \lambda}{cm_{ад}} \sqrt{\left[\frac{e \beta \Delta T}{e^k (1-k)} \right]^3}$.

Для нитрогликоля кривая $d_*'(T_0)$ идет несколько выше, чем $d_*(T_0)$.

² Интересно (см. рис. 2), что у литого тетрила без добавления сажи в условиях наших опытов наблюдались два сильно различающихся значения критического диаметра.

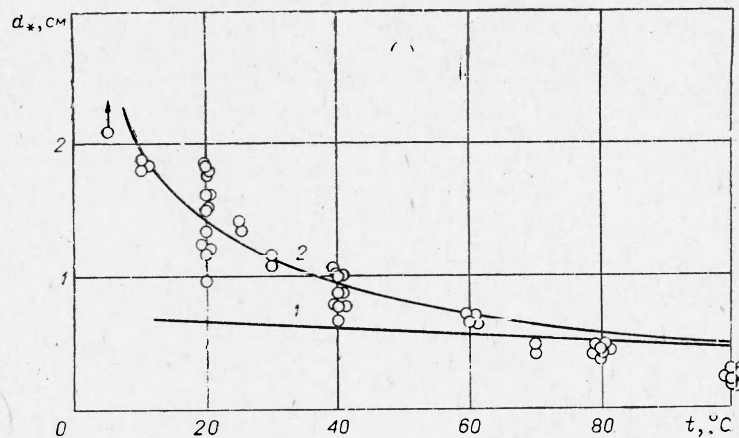


Рис. 1. Влияние начальной температуры на критический диаметр горения нитрогликоля. Кривые 1 и 2 проведены по формулам (3) и (4) соответственно.

шиться по сравнению с адиабатической не более чем в $\sqrt{e} \approx 1,65$ раза. Для конденсированных ВВ это соотношение меньше. В работе [1] приведено неравенство:

$$\frac{m_{гк}}{\sqrt{e}} > m_* > \frac{m_{ад}}{\sqrt{e}}, \quad (5)$$

где $m_{гк}$ — скорость горения ВВ ($г/см^2 \cdot сек$), нагретого до температуры кипения; $m_{ад}$ — скорость горения ВВ при данной температуре в адиабатических условиях; m_* — предельная скорость горения. Решение уравнения теплового баланса при горении ВВ с внешними потерями тепла наряду со значением критического диаметра дает также и величину предельной скорости:

$$m_* = m_{ад} \cdot e^{\frac{k-1}{2}}. \quad (6)$$

Опыты по установлению зависимости скорости горения от диаметра проводились с нитрогликолем в кварцевых цилиндрических трубках, погруженных в воду при 20, 40, 60 и 80° С. Во всех случаях скорость го-

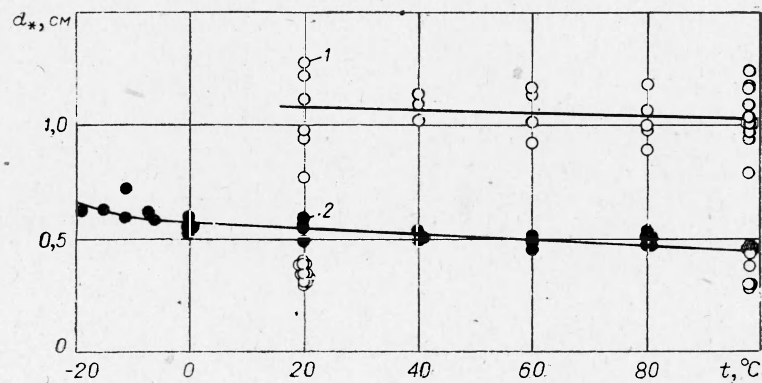


Рис. 2. Влияние начальной температуры на критический диаметр горения литого тетрила (1) и смеси его с 10% сажи (2).

рения росла при увеличении диаметра трубки [5]. Отношение адиабатической скорости к предельной составляло приблизительно 1,2. При расчете по формуле (6) оно меняется от 1,05 при 20° С до 1,22 при 80°. Учитывая некоторую неопределенность условий теплопередачи и значительный разброс результатов при диаметре, близком к предельному, большего согласия теории с опытом ожидать трудно. Напомним, что для метилнитрата при 20° С это отношение составляет 1,50 [5]. Теория дает величину 1,39.

4. Сильная зависимость критического диаметра горения от величины критерия Зельдовича в области $1 > k > \sim 0,5$ приводит к одному из наиболее парадоксальных следствий теории: критический диаметр горения может сильно расти при повышении давления. Действительно, при увеличении давления k растет ввиду повышения с давлением температуры кипения. Поскольку значение β слабо зависит от давления, при некотором $p = p_\infty$ будет $k=1$ и $d = \infty$.

Общий вид кривой $d_*(p)$ может быть получен из соотношения (4). Его анализ показывает, что кривая в координатах $p-d_*$ имеет минимум и две ветви, уходящие в бесконечность с асимптотами $p=0$ и $p=p_\infty$. Приняв

$$p = A \cdot e^{-\frac{Q_n}{R T_k}} = p_0 e^{a(k-k_0)} \quad (7)$$

и

$$m = B p,$$

где Q_n — скрытая теплота испарения ВВ; A — предэкспонент; p_0 — атмосферное давление; k_0 и k — критерии Зельдовича при атмосферном давлении и при давлении p ; $a = \frac{Q_n}{R T_k^0 T_k \beta}$; T_k^0 и T_k — температуры

кипения при атмосферном давлении и при давлении p , получим:

$$k_{\min} = \frac{2a}{1 + 2a}.$$

Значения p_{\min} и d_{\min} получаются подстановкой в формулы (4) и (7) величины k_{\min} . Эта последняя для обычных вторичных ВВ различается слабо (табл. 2). Теоретическая кривая для нитрогликоля приведена на рис. 3.

Таблица 2

Влияние давления на критический диаметр горения некоторых нитроэфиров при комнатной температуре

Нитроэфир	p_∞ , ата	p_{*min} , ата	d_{*min} , см	k_{\min}
Метилнитрат	18,8	10	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,84
Нитроглицерин	0,15	0,09	2,5	0,93
Гэн	0,039	0,024		0,93
Нитрогликоль	1,9	1,2	1,4	0,93

Экспериментальная проверка этих результатов затрудняется тем, что рост критического диаметра горения происходит в узком интервале давлений, отвечающем малому (от 0,9 до 1) интервалу изменения критерия k ; сам этот диаметр (при проведении опытов в водяной оболочке)

даже на минимуме может быть весьма велик (для нитрогликоля — 14 мм, для нитроглицерина — 25 мм); при повышенном давлении и соответствующей ему высокой температуре поверхности велика роль реакции в конденсированной фазе; наконец, при горении жидкостей неустойчивость по Я. Б. Зельдовичу нередко граничит с неустойчивостью по Л. Д. Ландау [3, 13]. Упомянем поэтому только о двух фактах.

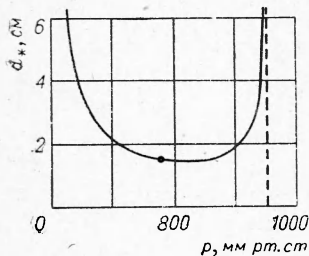


Рис. 3. Зависимость критического диаметра горения нитрогликоля по формуле (4) от давления. Точка при 760 мм рт. ст. — среднее из опытов при 20° С.

По данным [8], критический диаметр горения нитроглицерина при повышении давления может значительно увеличиваться (опыты проводились в условиях, когда возможна передача тепла по стенкам трубки, поэтому количественное сопоставление теории с опытом затруднительно¹).

Аналогично ведет себя тэн. При давлении выше 1,5—2 ат (и вплоть до 15—16 ат) он не способен к горению в тех условиях, при которых горел при атмосферном давлении. Хорошо известно, однако, [23], что большинство изученных в этом отношении веществ обнаруживают сильное уменьшение критического диаметра горения при повышении давления. На рис. 4 приведены зависимости $d_{*}(p)$ для

нескольких индивидуальных и смесевых ВВ, полученные при горении их в атмосфере азота в кварцевых конических трубках, помещавшихся в стакане с водой в бомбе постоянного давления (тетрил, дина, тэн, тротил — в виде литых зарядов, гексоген и амматолы — в виде порошкообразных, подпрессованных от руки до плотности 1,1—1,4 г/см³). Нетрудно заметить, что для многих из них в значительном интервале давлений критический диаметр горения обратно пропорционален давлению в степени, близкой к единице. Иными словами, с учетом близкой к прямой пропорциональной зависимости скорости горения указанных ВВ от давления они ведут себя подобно газам, для которых (см. формулу (1)) критический диаметр обратно пропорционален скорости горения.

Таким образом, начиная с давлений порядка десятков атмосфер, тепловая инерционность прогретого слоя перестает влиять на величину критического диаметра горения этих ВВ. Возможные причины этого — переход при повышении давления ведущей реакции горения в конденсированную фазу и увеличение потока тепла за счет излучения [16].

Детальный анализ устойчивости горения ВВ с учетом этих факторов осложнен отсутствием экспериментальных данных по тепловыделению в конденсированной фазе и интенсивности излучения для абсолютного большинства обычно применяемых взрывчатых веществ.

В свете теории Я. Б. Зельдовича рассмотрены экспериментальные данные по устойчивости горения некоторых вторичных ВВ, главным образом при атмосферном давлении.

1. Из рассматривавшихся нитроэфиров при атмосферном давлении и комнатной температуре в соответствии с теорией устойчиво горение нитрогликоля и метилнитрата и неустойчиво горение диглицольдинитрата, нитроглицерина и тэна. Поведение нитроклетчатки, тетрила и гексогена объясняется теорией, учитывающей роль выделения тепла в конденсированной фазе.

¹ Факт утрачивания нитроглицерином способности к горению при повышении давления [24] рассматривался Я. Б. Зельдовичем [1], как одно из основных подтверждений развитой им теории неустойчивого горения.

2. Показано, что критический диаметр горения нитрогликоля сильно растет при понижении температуры от 100 до 5—10° С. Эта зависимость в пределах разброса результатов опытов совпадает с полученной теоретически в предположении, что тепло теряется газовой фазой, а устойчивость горения определяется величиной градиента температуры у поверхности конденсированной фазы.

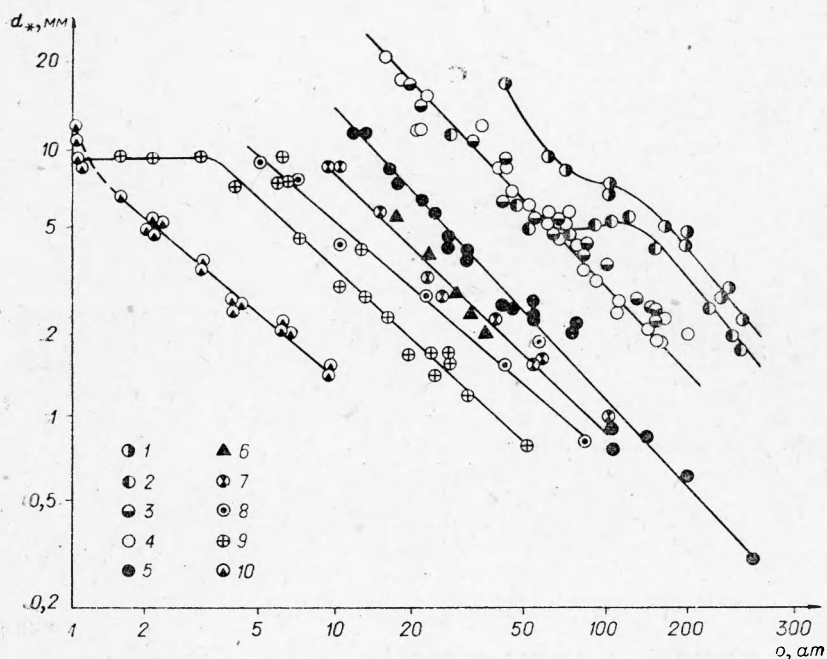


Рис. 4. Влияние давления на критический диаметр горения.

1 — амматол № 6; 2 — амматол № 6ЖВ; 3 — смесь амматол № 6 с 20% NaCl; 4 — амматол ПЖВ-20; 5 — тротил; 6 — дина; 7 — тэн; 8 — амматол № 6 с 5% сажи; 9 — тетрил; 10 — гексоген.

3. Установлено, что отношение адиабатической скорости горения нитрогликоля при 20—80° С к предельной значительно меньше, чем теоретическое для газовых смесей (~ 1—2 вместо 1,65). Для метилнитрата оно в соответствии с теорией больше (1,5), чем для нитрогликоля.

4. Рассчитана зависимость критического диаметра горения нитрогликоля, нитроглицерина, тэна и метилнитрата от давления. Приведены некоторые факты, подтверждающие эту зависимость. Показано, что для большинства изученных ВВ в широком (несколько сот атмосфер) интервале давлений она не выполняется, вероятно, ввиду перехода реакции в конденсированную фазу и влияния передачи тепла излучением.

Поступила в редакцию
15/VII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. 1942, 12, 11—12.
2. А. И. Коротков, О. И. Лейпунский. Сб. «Физика взрыва», 1953.
3. К. К. Андреев. «Термическое разложение и горение ВВ». М., «Наука», 1966.
4. М. С. Плясунов. Канд. дисс. МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1963; К. К. Андреев.

- ев, М. С. Плясунов. Сб. «Теория ВВ». Под ред. К. К. Андреева. М., «Высшая школа», 1967.
5. В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков. ФГВ, 1968, 4, 3.
 6. К. К. Андреев, П. П. Попова. ЖФХ. 1961, 35, 9.
 7. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1935, 1, 4, 220.
 8. К. К. Андреев, Г. Н. Беспалов. Сб. «Теория ВВ». М., Оборонгиз, 1963.
 9. T. Ishigura, S. Kato, S. Yagui, J. Pharm. Soc. Japan, 1949, 69, 25.
 10. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», 1953, 2.
 11. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1948, 22, 1, 91.
 12. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский и др. Докл. АН СССР, 1966, 169, 3.
 13. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.
 14. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1945, 50, 2.
 15. А. И. Гольбиндер, В. В. Горячев. ЖФХ, 1961, 35, 8, 1809.
 16. А. Д. Марголин, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1966, 2.
 17. Э. И. Максимов. Канд. дисс., ФИХФ, 1965.
 18. Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг. Сб. «Теория ВВ». Под ред. К. К. Андреева. М., «Высшая школа», 1967.
 19. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
 20. Я. Б. Зельдович, В. В. Воеводский. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. ММИ, 1947.
 21. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопроводность в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
 22. А. Ф. Беляев и Н. Н. Бахман. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.
 23. В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков. Сб. «Теория ВВ». Под ред. К. К. Андреева. М., Изд-во «Высшая школа», 1967.
 24. К. К. Андреев. Сб. статей по теории ВВ. Под ред. К. К. Андреева и Ю. Б. Харитона. М., Оборонгиз, 1940.

УДК 662.215

ВЛИЯНИЕ ВОДЫ, УГЛЕКИСЛОГО АММОНИЯ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ДОБАВОК НА ГОРЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков, Н. А. Полякова
(Москва)

Введение инертных веществ, понижающих температуру горения и скорость распространения пламени — один из широко применяемых методов исследования горения газов. В работах по горению конденсированных ВВ этот метод также используется, хотя и реже. Ранее он применялся, в частности, для изучения горения тетрила и тэна при 100 ат [1], нитроглицерина и пироксилина при атмосферном давлении [2], гидразина [3] и бездымных порохов [4]. В настоящей работе этот метод использовался для выяснения некоторых особенностей механизма горения тетрила, гексогена, пироксилина и амматола 79/21.

Опыты проводились в бомбе постоянного давления объемом 3 л в атмосфере азота. ВВ тщательно перемешивали с добавкой и прессовали до высокой (0,9—0,95 от максимально достижимой) плотности в цилиндрические трубки из плексигласа (внутренний диаметр 7, наружный 10, длина 35 мм) или вводили при меньшей (0,4—0,7 от максимальной) плотности в трубки из плексигласа или кварцевого стекла. Воспламенение осуществлялось накаливаемой электрическим током нихромовой проволокой, регистрация процесса производилась с помощью кинокамеры или барабанного фоторегистратора.