

Авторы выражают благодарность Ф. Л. Эйдельману за помощь в исследованиях на СЭМ и Н. Н. Суркову за помощь в измерении скоростей горения.

Поступила в редакцию
18/VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский, В. М. Пучков. Докл. АН СССР, 1971, 198, 361.
2. О. И. Лейпунский, А. Г. Истратов. II всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черноголовка, 1969, стр. 24.
3. И. У. Питтман. Ракетная техника и космонавтика, 1969, 2.
4. Н. Н. Бахман, П. Н. Лобанов и др. Докл. АН СССР, 1972, 202, 1107.
5. В. И. Авдюнин, Н. Н. Бахман, В. С. Никифоров и др., Изв. вуз. Химия и хим. техн., 1971, 5, 666.
6. В. К. Боболев, М. Я. Гени др. ФГВ, 1971, 3, 366.
7. J. D. Hightower, E. W. Price. Astronautica Acta, 1968, 14, 11.
8. T. L. Boggs, K. J. Kraeutle. Comb. Sci. and Techn., 1969, 1, 75.
9. R. L. Derr, T. L. Boggs. Comb. Sci. and Techn., 1970, 1, 369.
10. О. П. Коробейничев, А. С. Шмелев, А. В. Татевосян, ФГВ, 1972, 8, 3.

УДК 536.46

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ ПРИ СРЕДНИХ ДАВЛЕНИЯХ

Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов
(Москва)

Изучение горения в поле массовых сил является одним из новых методов, позволяющих получать дополнительную информацию о механизме горения конденсированных систем. Так, например, был показан рост скорости горения поливинилнитрата при атмосферном давлении с увеличением перегрузки [1], что качественно согласуется с выводами работы [2]: при горении подобных веществ ведущая стадия представляет собой дисперсную зону. В случае горения гексогена при атмосферном давлении [3] рост перегрузок приводит к уменьшению скорости горения, и это дает право утверждать, что механизм горения гексогена не относится к механизму горения летучих веществ. При изучении горения дины [4] оказалось, что скорость горения не зависела от перегрузки до определенных ускорений, выше которых дина не горит. Это обстоятельство позволило отнести горение дины к летучим ВВ.

Для тех веществ, механизм горения которых известен, эта методика позволяет сравнить количественные соотношения, вытекающие из теорий, с закономерностями горения этих веществ от перегрузки. Так, например, закономерности перехода жидких ВВ в режим турбулентного горения, теоретически описанные Ландау и Левичем [5], были экспериментально получены данным методом в работе [6].

В настоящей работе изучалось горение пироксилина, поливинилнитрата, гексогена, октогена и перхлората аммония при перегрузках до

900 g и давлениях до 70 ат при температуре вещества 20° С. В установке предусматривалось закрепление изучаемых образцов в двух положениях: когда массовая сила действовала со стороны продуктов реакции к фронту горения (a_+) и в противоположном направлении (a_-). Скорость горения определялась по фоторегистрации процесса на движущуюся пленку фоторегистра. Подробное описание установки приведено в работе [4].

Результаты экспериментов

Пироксилин. В опытах использовались образцы пироксилина $l=2,7$ см, $d=0,8$ см, $\rho=1,5$ г/см³ (l — длина образца, d — диаметр, ρ — плотность), полученные прессованием. Необходимая длина таблеток достигалась склеиванием ацетоном трех таблеток длиной 0,9 см. Перед опытами на боковую поверхность образцов наносилась эпоксидная смола, после чего образцы плотно вставлялись в стеклянные трубки длиной 4 см и внешним диаметром 1,1 см. Затем образцы выдерживались в сушильном шкафу с температурой 40° С до полного отверждения эпоксидной смолы. На боковой поверхности стеклянных трубок имелись два симметричных отверстия, в которые вставлялась спираль из вольфрама диаметром 0,5 мм. Спираль после опыта оставалась целой. Исследования скорости горения u в массовом поле (a_+) проводились при давлениях 1; 10; 40 и 70 ат (рис. 1).

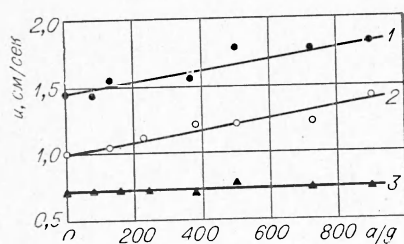


Рис. 1. График зависимости скорости горения пироксилина от перегрузки.

p , ат: 1 — 10; 2 — 40; 3 — 70.

Здесь a/g — отношение ускорения, создаваемого центрифугой, к ускорению свободного падения. При $p=1$ ат и $a/g=1$ пироксилин не горит, однако с увеличением перегрузки сгорала определенная часть образца. Длина остатков уменьшалась с увеличением перегрузки. Недогоревшие образцы имели незначительные воронкообразные углубления при перегрузках до 200 g, переходящие в значительные осевые прогары при 400 g и выше (рис. 2). Анализ горения пироксилина при $p=1$ ат показал, что увеличение скорости горения пироксилина в области (a_+), замеченное в работе [3], объясняется наличием осевых прогаров. При отрицательных перегрузках (a_-) при давлениях 10; 40; 70 ат скорость горения оставалась постоянной во всем исследуемом диапазоне ускорений. При $p=1$ ат образцы в этой области не горят.

Поливинилнитрат. Исследовались образцы поливинилнитрата (ПВН) с $\rho=1,5$ г/см³, $d=0,8$ см, $l=3$ см. Как и в случае с пироксилином, таблетки ПВН склеивались ацетоном, после чего образцы бронировались эпоксидной смолой и помещались в стаканчики из стекла. Исследования проводились при давлениях 1; 10 и 40 ат (рис. 3). Здесь

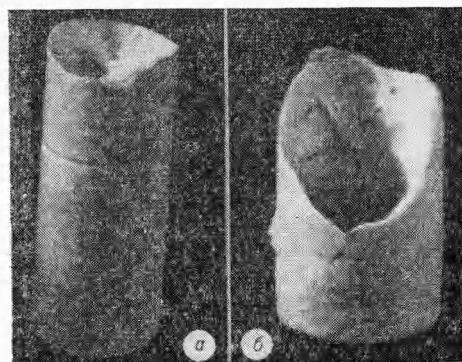


Рис. 2. Фотографии недогоревших образцов пироксилина.

а) $a_+ = 200$ g; б) $a_+ = 600$ g.

u — скорость горения при перегрузке, u_0 — скорость горения в неподвижной бомбе. Как видно из графика, с ростом давления эффект влияния ускорения на горение ПВН слабее. Зависимость $u(p, g)$ можно выразить формулой

$$\frac{u}{u_0} = 1 + \frac{(a/g)^{0,011p+54}}{63p}.$$

При отрицательных перегрузках (a_-) и давлениях 1; 4; 10; 40 ат скорость горения с увеличением перегрузки не меняется.

Горение **гексогена** в поле массовых сил при $p=1$ ат изучалось в работе [3]. Было установлено, что перегрузки приводят к уменьшению скорости горения и затуханию. В настоящей работе изучалось горение гексогена при давлениях 5; 10; 25; 50 и 70 ат. Образцы гексогена получали прессованием со средней плотностью $\rho=1,7$ г/см³, $l=3$ см, $d=8$ см.

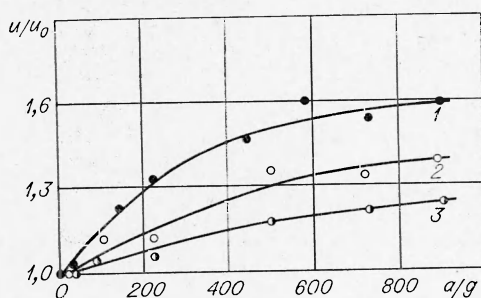


Рис. 3. График зависимости относительной скорости горения ПВН от перегрузки.
 p , ат: 1 — 1; 2 — 10; 3 — 40.

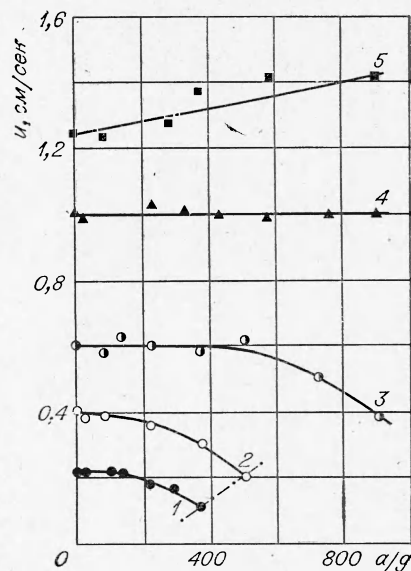


Рис. 4. График зависимости скорости горения гексогена от перегрузки.
 p , ат: 1 — 5; 2 — 10; 3 — 25; 4 — 50; 5 — 70.

Поскольку гексоген прессуется плохо, то он предварительно смачивался ацетоном. Ацетон удалялся путем выдержки образцов в сушильном шкафу при температуре 60° С. Выход ацетона контролировался взвешиванием образцов. Готовые образцы покрывались эпоксидной смолой и плотно вставлялись в кварцевые трубки с толщиной стенки 1,5 мм.

Данные опытов представлены на рис. 4. Каждая точка на графике является средней 5—7 опытов. Следует заметить, что значения предельных перегрузок взяты для случая, когда при данном давлении из серии опытов сгорало полностью 50% образцов. В большинстве случаев для давлений 5 и 10 ат с увеличением перегрузки менялся также характер горения. Вблизи ($a_{пр}$) горение сопровождалось интенсивной пульсацией свечения. На рис. 5 приведены типичные записи горения гексогена при малых перегрузках и вблизи предела горения. При давлении $p=25$ ат предела горения по перегрузкам в исследуемом диапазоне обнаружить не удалось, однако наблюдалось уменьшение скорости горения. При $p=50$ и 70 ат пульсации свечения не наблюдались.

Поскольку гексоген при горении образует расплавленный слой, то в области a_- происходило расплескивание слоя и образцы не зажигались.

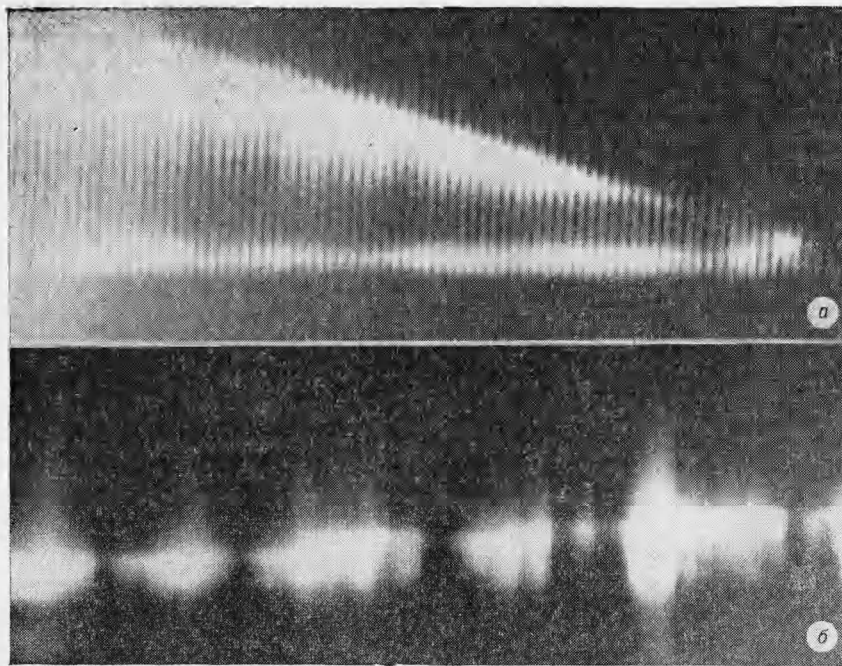


Рис. 5. Типичные записи горения гексогена при перегрузках.
а) $p=10$ ат, $a_{\text{пр}}=100$ г; б) $p=10$ ат, $a_{\text{пр}}=500$ г.

Октоген в опытах использовался в виде образцов плотностью $1,82 \text{ г/см}^3$, длиной $2,6 \text{ см}$, диаметром $0,8 \text{ см}$, методика приготовления которых аналогична методике приготовления образцов гексогена. Горение октогена изучалось при давлениях 5; 25 и 70 ат. В отличие от гексогена скорость горения октогена с ростом перегрузки не меняется при всех давлениях (рис. 6), однако имеется предел горения по перегрузке для $p=5$ ат ($a_{\text{пр}}=500 \text{ г}$). Как и для случая с гексогеном, вблизи предела горения наблюдалось пульсирующее свечение. При $p=25$ и 70 ат такого свечения не наблюдалось.

Перхлорат аммония (ПХА) дважды перекристаллизовывался. Образцы приготавливались прессованием с плотностью $\rho=1,95 \text{ г/см}^3$, диаметром $0,8 \text{ см}$ и длиной 2 см . Использовалась фракция ПХА 250—500 мк. Небронированная таблетка ПХА вставлялась в стеклянную трубку с внешним диаметром $1,2 \text{ см}$ и длиной 18 см так, чтобы зазор между боковой поверхностью образца и внутренней стенкой трубки составлял 1 мм . Зажигание ПХА производилось спиралью вольфрама диаметром $0,2 \text{ мм}$, пропущенной через боковые отверстия в трубке. Трубка позволяла отводить продукты реакции в центр вращающегося объема бомбы, что значительно облегчало фоторегистрацию процесса. Поскольку свечение ПХА было слабым, использовалась подсветка. Пучок света от лампы проходил

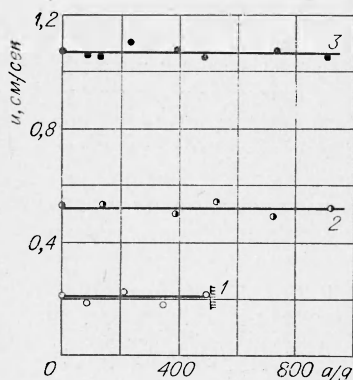


Рис. 6. Зависимость скорости горения октогена от перегрузки.
 p , ат: 1 — 5; 2 — 25; 3 — 70.

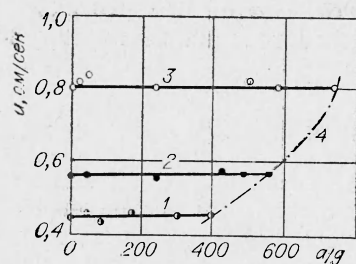


Рис. 7. Зависимость скорости горения ПХА от перегрузки.
1 — $p=32$ ат; 2 — $p=50$ ат; 3 — $p=70$ ат; 4 — граница устойчивого горения.

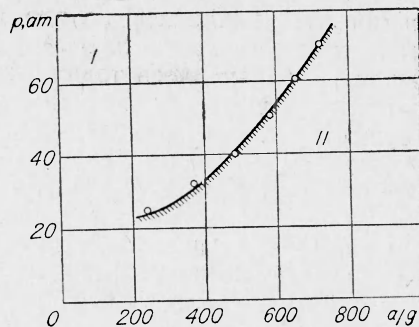


Рис. 8. Зависимость предела горения ПХА от перегрузки.
I — область устойчивого горения; II — область, где ПХА не горит.

через щель камеры и попадал на фоторегистр, т. е. скорость горения определялась по тени, отбрасываемой горящим образцом на пленку. Была определена зависимость скорости горения ПХА от перегрузки при давлениях 32; 50 и 70 ат. С увеличением перегрузки скорость горения не менялась до определенных ускорений, выше которых ПХА не горел (рис. 7). Пределы горения по перегрузкам для давлений от 24 до 70 ат приведены на рис. 8. Вблизи пределов горения часто наблюдалась неравномерность горения, т. е. в конце участка горения скорость повышалась и была выше, чем на начальном участке. Типичные записи

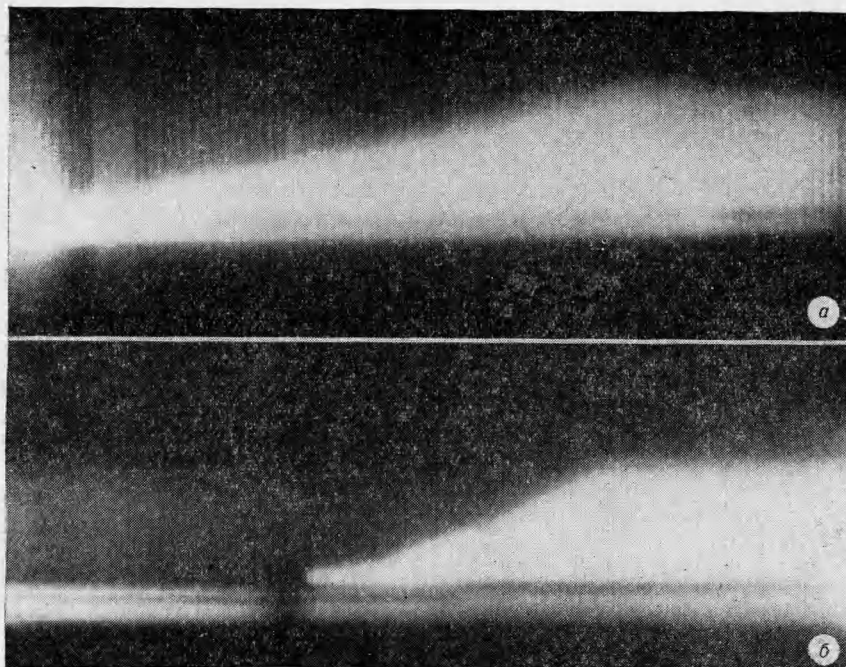


Рис. 9. Типичная запись горения ПХА.
а) $p=50$ ат, $a_+ = 200$ г; б) $p=50$ ат, $a_+ = 580$ г.

горения ПХА приведены на рис. 9. Анализ недогоревших образцов показал, что их поверхность очень сильно изрыта (рис. 10). В области a_- горение ПХА изучалось только при $p=32$ ат. В этой области скорость горения не зависит от величины a_- , и предела горения по перегрузкам не существует.

Особенности зажигания

Следует заметить, что в данной работе при изучении горения гексогена и октогена наблюдались трудности с зажиганием исследуемых образцов. Как правило, одной спиралью зажечь ВВ не удалось, так как образцы гасли, как только поверхность горения отходила от спирали. Поэтому под спираль, которая пропускалась через отверстия в стенках

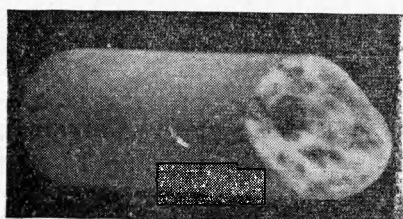


Рис. 10. Фотография недогоревшего образца ПХА при $p=50$ ат, $a_+=580$ г.

стаканчика, помещалась поджигающая таблетка поливинилнитрата высотой 3 и диаметром 8 мм. Сверху спираль засыпалась порошком ПВН и поджигалась второй таблеткой диаметром 9 мм.

При изучении горения дины в поле массовых сил [7] использовалась следующая система поджигания. Растапливался верхний слой дины, затем в жидкий слой помещалась таблетка поджигающего состава диаметром 7 и высотой 5 мм так, чтобы таблетка

выступала из вещества. После застывания дины через отверстия в стаканчике пропускалась спираль и сверху плотно вставлялась таблетка поджигающего состава.

Поджигание спирали к веществу поджигающими таблетками было применено также в опытах с пироксилином и поливинилнитратом.

Заключение

В данной работе исследованы вещества с различными механизмами горения. Экспериментально показано, что скорость горения с ростом перегрузки может увеличиваться (ПВН, пироксилин при давлениях выше 10 ат), уменьшаться (гексоген ниже 25 ат) и не меняться от перегрузки. (ПХА, октоген, гексоген при 50 ат и пироксилин до 10 ат).

Для гексогена, октогена, ПХА имеется предел горения по перегрузке, зависящий от давления.

Некоторые полученные закономерности могут быть объяснены на основании существующих представлений о механизме горения. Так, например, увеличение скорости горения ПВН и пироксилина выше 10 ат можно объяснить сжатием дисперсной зоны, являющейся ведущей. Незменчивость скорости горения октогена, гексогена при 50 ат и пироксилина объясняется тем, что ведущая стадия находится в газовой фазе. Отметим, что закономерности, полученные для пироксилина, и их объяснение согласуются с выводами работы [8], основывающимися на других экспериментах. В отношении ПХА, исходя из полученных результатов, нельзя сказать, какая стадия горения является ведущей.

При объяснении пределов горения по перегрузкам можно использовать доводы, приведенные в работе [2], основывающиеся на том, что с ростом перегрузки величины, входящие в критерий устойчивости по Зельдовичу, меняются. Возможно, что этот механизм проявляется и в

данном случае. Снижение скорости гексогена с ростом перегрузки объяснялось в работе [3].

Авторы благодарят А. Г. Мержанова за ценные советы и помощь в работе.

Поступила в редакцию
20/VI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 3, 323.
2. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1964, 157, 12, 412.
3. Э. И. Максимов, Б. Б. Серков, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 4, 600.
4. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2, 197.
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953.
6. С. К. Орджоникидзе, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил. III всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черноголовка, 1971.
7. Ю. М. Максимов, Э. И. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2.
8. А. К. Филоненко. Канд. дисс. М., ФИХФ АН СССР, 1969.

УДК 536.46+662.222

О ГОРЕНИИ СОЛЕЙ ТЕТРАМИНА МЕДИ (II)

В. В. Горбунов, Л. Ф. Шмагин
(Москва)

В работе [1] было показано, что скорость горения перхлоратов аминов меди (II), никеля (II) и кобальта (III) в 15—20 раз выше скорости горения нитратов тех же аминов.

В настоящей работе исследовалось горение комплексных солей тетрамина меди (II) (ТАМ) общей формулы
 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{An})_2$,

где

$\text{An} = \text{BrO}_3^-; \text{ClO}_3^-; \text{ClO}_4^-; \text{MnO}_4^-; \text{NO}_3^-; \text{NO}_2^- \text{ и } \text{JO}_3^-$.

Комплексные соли получались по методам, аналогичным описанным в [2], и анализировались на содержание меди и аммиака. Применялись заряды с относительной плотностью не менее 0,90, запрессованные в плексигласовые трубки диаметром 7 или 4 мм. Опыты проводились в бомбе постоянного давления в атмосфере азота при давлениях до 100 *ати*. Скорость горения измерялась с помощью фоторегистра. Термическая устойчивость комплексных солей оценивалась по времени задержки вспышки ($\tau_{\text{зад}}$) навески 0,05 г при температуре 280°С.

Результаты опытов и расчетов теплоты и температуры горения приведены в таблице и на рисунке.

В изученном интервале давлений наибольшую скорость горения имеет бромат ТАМ. При давлениях 20—100 *ати* хлорат и перхлорат ТАМ близки по скорости и уступают в этом отношении бромату ТАМ. Бромат, хлорат и перхлорат ТАМ горят при атмосферном давлении со скоростями 3,0; 1,8 и 0,6 г/см²·сек соответственно. Перманганат ТАМ начинает гореть при 8 *ати*; при более высоких давлениях скорость его горения почти в 2 раза меньше, чем у перхлората. Значительно медлен-