

## ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ

Б. Б. Серков, Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов  
(Москва)

В работе [1] было высказано предположение, что при горении в условиях больших перегрузок вещества с различным механизмом горения будут вести себя различным образом.

Действительно, зона горения конденсированных веществ может состоять из различных компонентов неодинакового фазового состояния. При воздействии массовых сил вследствие разницы в плотностях компонентов может происходить деформация зоны горения, что должно сказаться на закономерностях горения. В связи с этим представлялось интересным исследовать картину горения широкого класса веществ в искусственно созданном поле массовых сил.

Настоящая работа посвящена изложению результатов экспериментального исследования скорости горения некоторых конденсированных систем (пироксилин, гексоген, смесевые составы на основе перхлората аммония, железоалюминиевый термит) при перегрузках до  $\pm 900$  g ( $g$  — ускорение свободного падения), создаваемых с помощью центрифуги. Опыты проводились при атмосферном давлении. Описание установки и методика эксперимента подробно изложены в работе [1].

### ГЕМОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ

**Пироксилин**, как известно, является нелетучим взрывчатым веществом, на скорость горения которого существенно влияет процесс разложения конденсированной фазы [2—4].

В опытах использовались образцы пироксилина  $l=2,7$  см;  $d=0,8$  см;  $\rho=1,45$  г/см<sup>3</sup> ( $l$  — длина,  $d$  — диаметр,  $\rho$  — плотность), полученные прессованием. Необходимая длина образца достигалась склейкой трех таблеток длиной 0,9 см. Боковая поверхность образцов бронировалась раствором плексигласа в дихлорэтане.

При сжигании образцов пироксилина при положительных перегрузках<sup>1</sup> было обнаружено, что по мере возрастания перегрузки от 0 до +900 g линейная скорость горения увеличивается приблизительно в 3 раза (рис. 1). Как правило, образцы сгорали полностью, но были случаи самопроизвольного гашения. Погасшие образцы имели небольшие воронкообразные углубления при перегрузках до +220 g, переход-

<sup>1</sup> Для краткости положительной перегрузкой  $a_+$  именуется случай, когда вектор перегрузки направлен в сторону исходного вещества; отрицательной  $a_-$  — в противоположную.

дящие в значительные осевые прогары при  $+400\text{ g}$  и выше. При  $a_+ = 700 \div 900\text{ g}$  погасшие образцы представляли собой трубочки с внутренним диаметром 0,6—0,7 см. Фоторегистрация процесса не обнаружила каких-либо качественных отклонений от горения в нормальных условиях, т. е. при отсутствии перегрузок (рис. 2, а).

При отрицательных перегрузках картина горения значительно сложнее. Некоторое время с момента зажигания наблюдалось нормальное горение, затем возникал «срыв», характеризующийся резким увеличением скорости горения. На участке нормального горения линейная скорость горения была несколько ниже, чем в нормальных условиях, и ее величина падала с возрастанием перегрузки (рис. 1, 1).

При небольших перегрузках образцы сгорали полностью. «Срыв» горения наблюдался, начиная с  $a_- = 30\text{ g}$  (рис. 2, б). По мере увеличения перегрузки длина образца, на которой наблюдалось нормальное горение, уменьшалась (рис. 3). При перегрузках свыше  $a_- = 450\text{ g}$  «срыв» наступал практически вслед за воспламенением образца (рис. 2, в).

Учитывая свойства пироксилина, можно предположить, что его механизм горения близок к механизму горения поливинилнитрата (ПВН) [1, 5, 6]. Поэтому представляется возможным объяснить картину горения пироксилина при перегрузках, используя доводы, изложенные в работе [1]. Под действием массовых сил дисперсная зона, образующаяся

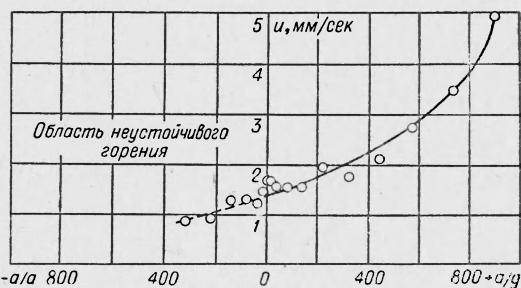


Рис. 1. Зависимость скорости горения пироксилина от перегрузок (каждая точка является средней 5—6 опытов).

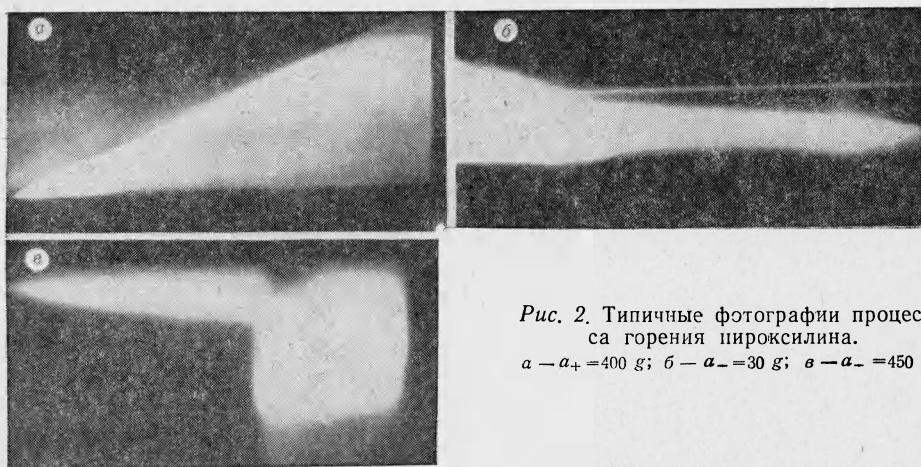


Рис. 2. Типичные фотографии процесса горения пироксилина.  
а —  $a_+ = 400\text{ g}$ ; б —  $a_- = 30\text{ g}$ ; в —  $a_- = 450\text{ g}$

при горении, сжимается (или растягивается), что приводит к увеличению (или уменьшению) скорости горения. «Срыв» возникает за счет локального разрушения жидкого слоя при отрицательных перегрузках, в результате чего происходит прорыв горячих газов в поры неразложившегося вещества.

**Гексоген.** В работах [7, 8] показано, что гексоген горит по механизму летучих ВВ, а в [9] предполагается, что ведущая стадия горения гексогена лежит в газовой фазе, но процесс разложения конденсированной фазы также оказывает влияние на скорость горения. Характерным для горения гексогена является образование значительного (0,08—0,10 см) жидкого слоя.

В опытах использовались образцы  $l=3,0$  см,  $d=0,8$  см,  $\rho=1,6$  г/см<sup>3</sup>, полученные прессованием. Так как сухой гексоген прессуется плохо,

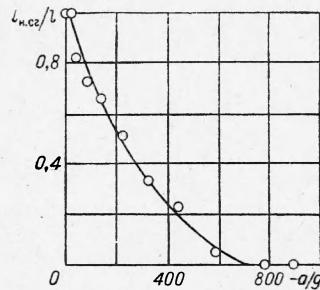


Рис. 3. Зависимость длины образца пироксилина, на которой наблюдается нормальное горение, от отрицательной перегрузки.

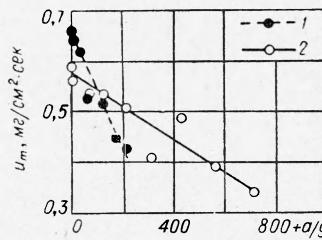


Рис. 4. Зависимость скорости горения гексогена от перегрузок.

1 — образцы в оболочке (каолин + силикатный клей); 2 — образцы в стеклянной оболочке.

его смачивали предварительно ацетоном. Ацетон удалялся путем 12-часовой выдержки готовых образцов в сушильном шкафу при 60°С. Выход ацетона контролировался взвешиванием образцов. В качестве бронировки использовалась смесь каолина с силикатным клеем. Толщина бронировки выдерживалась  $\sim 0,01$  см. Применение довольно толстой оболочки было вызвано необходимостью ее сохранности, так как только неразрушающаяся в процессе горения оболочка может предотвратить растекание жидкого слоя. Поскольку из литературы известно, что оболочка может оказывать влияние на скорость горения гексогена [10], была проведена серия опытов по сжиганию гексогена в оболочке каолин + силикатный клей при отсутствии перегрузок, на основании которой была выбрана толщина 0,01 см, практически не влияющая на скорость горения гексогена, не разрушающаяся в процессе горения и позволяющая вести фотографирование процесса. Результаты этой серии опытов сведены в таблице.

Толщина оболочки, см	0,010	0,015	0,020	0,100	0,140	0,220
Скорость горения, г/см <sup>2</sup> ·сек	0,066	0,069	0,067	0,064	0,054	0,050

Сжигание образцов гексогена при перегрузках обнаружило, что массовая скорость горения уменьшается в 1,5 раза при изменении положительной перегрузки от 0 до 220 г (рис. 4). Начиная с  $a_+=40$  г большинство образцов гасли, не додорев до конца. При перегрузках выше  $a_+=220$  г гексоген не воспламенялся, несмотря на то, что жидкий слой образовывался, и в некоторых случаях (при длительном воздействии тепла от поджигающей спирали) его толщина достигала

0,20—0,25 см. Если образец воспламенялся при перегрузке ниже +40 g, а затем перегрузка возрастала, то образец гас при  $a_+ = 200-250$  g.

Аналогичные опыты были проведены с образцами гексогена, заключенными в стеклянную оболочку толщиной 0,15 см. Такая толщина обусловлена тем, что при меньших толщинах стекло плавится и деформируется в сторону фронта горения. Общий характер зависимости скорости горения гексогена от перегрузки в этом случае сохраняется, однако эта зависимость выражена менее резко (см. рис. 4). Затухание горения наблюдалось начиная с  $a_+ = 320$  g; не воспламенялись образцы только начиная с  $a_+ = 720$  g. По-видимому, наблюдаемое различие обусловлено влиянием довольно толстой стеклянной оболочки.

При отрицательных перегрузках гексоген, расплавляясь, сразу же «расплескивался» и воспламенения не происходило. Наблюдаемые закономерности горения гексогена при положительных перегрузках трудно объяснить с точки зрения механизма горения летучих ВВ. Приняв во внимание реакцию в конденсированной фазе, можно с некоторой долей вероятности предложить следующее толкование. При положительной перегрузке облегчается выход из жидкого слоя пузырьков газообразных продуктов разложения, вследствие увеличения архимедовой силы, в результате чего уменьшается автокатализ, идущий на границе жидкость — пузырек газа, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости горения и затуханию.

#### ГЕТЕРОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Кроме гомогенных веществ, исследовались также и смесевые составы. Можно полагать, что массовые силы будут влиять на процессы смешения и распределения окислителя и горючего в зоне реакции.

**Смесевые составы на основе перхлората аммония (ПХА).** Для исследования были выбраны два состава на основе ПХА:

1. 90% ПХА (фракции 73÷100 μ) +10% полиэтилена (ПЭ).
2. 80% ПХА (фракции 73÷100 μ) +15% ПЭ +5% Al (пудра со средней толщиной чешуек  $\sim 3$  μ).

Скорости горения обоих составов в отсутствие перегрузок оказались приблизительно равны.

Вопрос о ведущей стадии горения составов на основе ПХА является дискуссионным [11—13, 17], однако большинство исследователей считают, что ведущая стадия горения лежит в газовой фазе.

В опытах использовались образцы  $l=2,7$  см,  $d=0,8$  см,  $\rho=1,60$  г/см<sup>3</sup> (состав 1),  $\rho=1,64$  г/см<sup>3</sup> (состав 2), бронированные с боковой поверхности бакелитовым лаком.

Оказалось, что скорость горения состава 1 не зависит от положительных перегрузок в области от 0 до +900 g. В отрицательной области от 0 до -900 g скорость горения возросла по сравнению с нормальной в 3,6 раза (рис. 5).

Независимость скорости горения неалюминизиро-

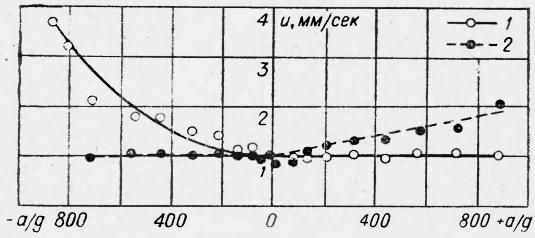


Рис. 5. Зависимость скорости горения смесевых составов от перегрузок.  
1 — состав 1; 2 — состав 2.

ванного состава от положительной перегрузки объясняется, по всей вероятности, тем фактом, что ведущая стадия горения данного состава (при  $p=1 \text{ atm}$ ) лежит в газовой фазе, весьма слабо подверженной влиянию массовых сил. Возрастание скорости горения в отрицательной области есть, по-видимому, результат механического разрушения конденсированной части фронта горения, что приводило к более быстрому перемещению поверхности горения. На этот факт указывает большое количество кусочков неразложившейся смеси, обнаруженных на задней стенке камеры сгорания.

При воздействии положительной перегрузки (от 0 до +900 g) на горящий образец состава 2 скорость горения увеличивалась в 2 раза. Воздействие отрицательной перегрузки до  $-725 \text{ g}$  не оказалось влияния на скорость горения данного состава (см. рис. 5). Измерить скорость горения при перегрузках выше  $-725 \text{ g}$  не удалось из-за интенсивного разрушения образцов.

Причина увеличения скорости горения алюминизированного состава в данном случае, вероятно, заключается в следующем. Перегрузка, направленная к поверхности горения, препятствует уносу газом несгоревших частиц Al, и тем самым увеличивается температура в зоне реакции, что приводит к увеличению скорости горения. Перегрузка, направленная от поверхности горения, способствует уносу частиц Al, но, видимо, снижение скорости горения, которое должно наблюдаться в этом случае, компенсируется механическим разрушением конденсированной части фронта горения [14]. Полная компенсация двух процессов (снижение скорости горения за счет уноса частиц Al и увеличение ее за счет механического разрушения образца), по всей вероятности, случайна. Варьируя соотношение компонентов, можно, по-видимому, добиться преобладания одного из процессов. К сожалению, данный состав при атмосферном давлении устойчиво горит только в случае принятого соотношения компонентов, не допуская каких-либо отклонений.

Интересным является тот факт, что оба состава в отличие от пироксилина и ПВН горели устойчиво при отрицательных перегрузках, несмотря на интенсивное разрушение поверхности горения.

Отметим, что в работе [15] авторы также получили независимость скорости горения неалюминизированного состава и возрастания скорости горения алюминизированного состава на основе ПХА при положительных перегрузках (до  $a_+ = 100 \text{ g}$ ).

**Горение термитного состава.** Механизм горения железоалюминиевых термитов исследован в работах [6, 16]. Показано, что процесс горения термита определенного состава проходит «чисто в конденсированной фазе».

Был взят «безгазовый» термит следующего состава 20% Al + +80% FeO, разбавленный продуктом конечного разложения ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в соотношении: 81,5% термит + 18,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Исследования проводились на образцах  $l=1,7 \text{ см}$ ;  $d=1,0 \text{ см}$ ;  $\rho=2,9 \text{ г}/\text{см}^3$  (ρ максимально возможное равно  $4,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Поскольку все компоненты термита (исходные и конечные) при температуре горения находятся в расплавленном состоянии [6, 16], то, чтобы избежать растворения образца при перегрузке, на него надевалась стеклянная трубочка толщиной 0,15 см. Считалось, что влияние стеклянной трубочки на скорость горения термита незначительно из-за большой скорости горения.

В области положительных перегрузок от 0 до +895 g скорость горения данного термитного состава увеличивалась приблизительно

в 6 раз (рис. 6). Образцы после опыта имели глубокие «воронки» в центре. Плотность продуктов сгорания на дне «воронки» была несколько выше, чем плотность исходного вещества. На стеклянных трубочках были обнаружены следы выплеснувшегося термита.

В отрицательной области провести опыты не удалось из-за отрыва расплавленного слоя от твердого вещества.

Объяснить увеличение скорости горения в данном случае можно следующим образом. При воспламенении термита первым расплавляется алюминий и в жидком состоянии под действием перегрузки устремляется в поры еще не реагирующего вещества. Возникает картина, аналогичная прорыву горячих газов в поры при горении конденсированных ВВ [10].

В результате проведенных исследований установлено, что массовые силы существенно влияют на закономерности горения конденсированных систем. Характер и степень влияния зависят как от величины и направления создаваемых перегрузок, так и от типа самой системы.

1. Скорость горения пироксилина увеличивается под действием  $a_+$ .

2. Горение пироксилина становится неустойчивым в области отрицательных перегрузок ( $a_-$ ). Неустойчивость проявляется в резком возрастании нормальной скорости горения.

3. Скорость горения гексогена уменьшается при воздействии  $a_+$ . Существует критическое значение  $(a_+)_\text{кр}$ , выше которого гексоген не горит.

4. Скорость горения смеси 90% ПХА + 10% ПЭ не зависит от  $a_+$  и увеличивается при воздействии  $a_-$ .

5. Скорость горения смеси 85% ПХА + 10% ПЭ + 5% Al увеличивается при воздействии  $a_+$  и не зависит от  $a_-$ .

6. Скорость горения железоалюминиевого термита увеличивается при воздействии  $a_+$ .

Полученные результаты носят характер первичной информации и еще не получили не только количественного, но и строгого качественного обоснования (многие объяснения носят предположительный характер). Более глубокое изучение данной проблемы должно явиться предметом дальнейших исследований.

В связи с тем, что влияние массовых сил сильно зависит от механизма горения, исследование закономерностей горения в таких условиях может явиться одним из методов изучения механизма горения.

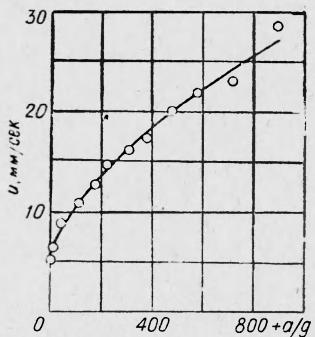


Рис. 6. Зависимость скорости горения железоалюминиевого термита от перегрузок.

Поступила в редакцию  
22/VI 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, Ю. М. Максимов. ФГВ, 1967, 3, 3.
2. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва». М., Изд-во АН СССР, 1953, 2.
3. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Докл. АН СССР, 1963, 152, 4.

4. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Изв. АН СССР, ОХН, 1963, 3.
5. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 1.
6. Э. И. Максимов. Докт. дисс. М. ФИХФ АН СССР, 1966.
7. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1938, 12, 93.
8. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1948, 22, II, 92.
9. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, Ю. Р. Колесов. Докл. АН СССР, 1965, 162, 5, III15.
10. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., 1966.
11. M. Summerfield a coll. Solid Propellant Rocket Research Progress in Astronautics and Rocketry. V. I. N. Y.—London, 1960.
12. R. F. Chaiken, W. H. Andeson. Solid Propellant Rocket Research edited by M. Summerfield, Princeton University. N. Y.—London, 1960.
13. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., 1967.
14. А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1960, 135.
15. Кроу, Виллоуби. В. Р. Т., 1967, 1.
16. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 4.
17. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова. ЖФХ, 1965, 39, 2.