

## ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», № 2, 1953, стр. 181.
2. А. А. Зенин. Канд. дисс. М., 1962.
3. О. П. Коробейничев, В. В. Болдырев и др. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1969, 4, 778.
4. D. I. Hewkin, I. A. Hicks. Combustions Science and Technology, 1971, 2, 307.
5. Пат. США № 3138499.
6. Пат. США № 3102834.
7. К. К. Андреев, А. П. Глазкова и др. ЖФХ, 1958, 32, 1726.

УДК 629.7.036.54

## О НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЭРОЗИИ ПОРОХА

Ю. И. Медведев, Л. Н. Ревягин

(Томск)

Отношение скорости горения пороха в присутствии колебаний скорости газового потока  $u$  к нормальной  $u_0$  будем называть коэффициентом динамической эрозии  $\varepsilon_g$ . Его определение представляет сложную экспериментальную задачу, решение которой возможно при наличии прибора с устойчивым полем колебаний, высокой амплитудой и заданной частотой при уверенной регистрации этих параметров. В наших опытах использовалась двухсекционная камера Прайса [1, 2] (рис. 1). Для определения скорости горения в условиях колебаний служит секция II диаметром 44 мм, неустойчивая по отношению к продольным колебаниям. Заряд секции вибрационного горения представляет собой цилиндрическую канальную шашку, забронированную по торцевой и боковой поверхностям. Продукты сгорания истекают через отверстие в боковой стенке заряда, совмещенное с отверстием камеры диаметром 20 мм. После воспламенения запалами в этой секции устанавливаются колебания с частотой  $f=c/2l$ , где  $c$  — скорость звука в продуктах сгорания,  $l$  — длина секции II. На одном конце этой секции имеется отверстие для пьезодатчика высокочастотных колебаний давления  $\bar{p}$ , на другом — расположен блок подачи воды для гашения заряда при сбросе давления.

Контрольная секция I имеет аналогичную конструкцию. В отличие от экспериментальной установки Крампа и Прайса заряд секции стационарного горения был не трубчатого, а стержневого типа. Это приводит к надежному демпфированию колебаний и позволяет свести к минимуму изменение среднего давления в процессе опыта. Как показывают измерения, стационарное давление  $p_0$  в обеих частях установки оказывается одинаковым и равным давлению в полости акустического фильтра III.

Длина обеих секций установки может изменяться присоединением дополнительных частей. Это позво-

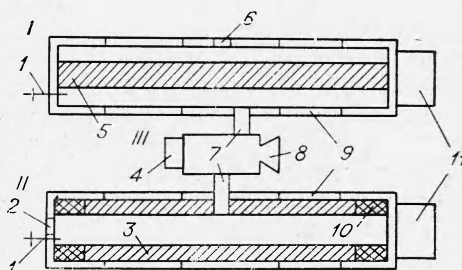


Рис. 1. Схематическое изображение двухсекционной камеры сгорания.

1 — запал; 2 — гнездо датчика высокочастотных колебаний; 3 — цилиндрическая шашка; 4 — блок сброса давления; 5 — стержневая шашка; 6 — гнездо датчика среднего давления; 7 — соединительные патрубки; 8 — сопло; 9 — дополнительная часть; 10 — негорючий вкладыш; 11 — блок подачи воды.

ляет изменить частоту колебаний, возникающих в секции вибрационного горения. Амплитуда колебаний варьируется с помощью пассивных негорючих вкладышей. Иногда в роли таких вкладышей выступали образцы, изготовленные из другого топлива, более или менее склонного к возбуждению колебаний, чем испытуемое.

Прерывание горения необходимо для измерения толщины выгорания свода по длине заряда и определения средней во времени величины нестационарной скорости горения  $u$  в секции II или значения  $u_0$  в контрольной секции I. Тушение зарядов производится сбросом давления с одновременной подачей воды. В ходе эксперимента измеряются амплитуда и частота колебаний давления, среднее давление, время работы установки, толщина сгоревшего свода контрольного заряда и заряда секции вибрационного горения. Таким образом, получаются все величины, необходимые для определения коэффициента динамической эрозии  $\varepsilon_g$ .

При измерении толщины сгоревшего свода, достигающей 10—15 мм, встречается ряд трудностей. Во-первых, поверхность горения, особенно в местах пучности акустической скорости стоячей волны, покрыта хорошо выраженной рябью, высота вершин которой достигает 0,3 мм. Во-вторых, из-за наличия бокового отверстия в середине заряда II возмущение поля течения в этом месте может повлиять на точность результатов. Поэтому данные непосредственных измерений сверялись с результатами интерполяции, проведенной из соответствующих точек, равноудаленных от осевой линии бокового отверстия. Толщина сгоревшего свода у концов заряда II (пучность давления стоячей волны) также контролировалась экстраполяцией результатов измерений, так как из-за наличия на концах заряда бронировки в этих местах могут наблюдаться аномалии скорости горения. Все полученные зависимости соответствуют случаям, когда оба способа давали совпадающие результаты. Критерием достоверности полученных значений стационарной скорости горения являлось совпадение величины  $u_0$ , найденной из обмеров заряда контрольной секции I, с паспортной характеристикой пороха.

Для получения достоверных результатов необходимо исключить возможность появления эффектов стационарной эрозии, особенно в секции II, где средняя скорость потока газов может достигать больших значений. С этой целью выбирались такие начальные диаметры каналов, при которых максимальная скорость течения продуктов сгорания была существенно ниже порогового значения стационарной эрозии. В процессе горения эта скорость могла только уменьшаться.

Проводились контрольные опыты без высокочастотных колебаний. Анализ погашенных зарядов показал, что выгорание топлива вдоль шашки в стационарном случае было равномерным, а сама поверхность горения была достаточно ровной. Если в процессе испытаний генерировались мощные акустические волны, то всегда на поверхности горения появлялась характерная рябь, наиболее развитая в местах, соответствующих пучности скорости стоячей волны, и в определенных случаях наблюдалось изменение скорости толщины сгоревшего свода.

Для сопоставления результатов испытаний с данными по статической эрозии топлив предлагается использовать не амплитудную скорость газов в волне  $\xi$ , а ее эффективное значение за период колебаний  $T$ . Легко видеть, что

$$v_{эф} = \frac{2}{T} \xi \int_0^{T/2} \cos 2\pi \frac{t}{T} dt = 0,637\xi.$$

Результаты исследования трех порохов типа Н с добавками 2% окиси магния, 2,5% окиси свинца и 0,5% графита представлены в виде зависимостей  $\varepsilon_g = \varepsilon_g(v_{эф})$  и  $\varepsilon_g = \varepsilon_g(f)$ .

На рис. 2 изображены кривые  $\varepsilon_g(v_{эф})$  для некоторых порохов. Видно, что характер расположения кривых 1, 2 и 3, 4 для двух разных порохов идентичен. Соотношения  $\varepsilon_g = \varepsilon_g(v_{эф})$  показывают, что основная особенность процесса динамической эрозии состоит в снижении величины порогового значения скорости потока  $v_{эф}$  по сравнению со случаем стационарного течения  $v_*$  примерно в два раза.

На рис. 3 изображены соотношения  $\varepsilon_g = \varepsilon_g(f)$ . Значение эффективной скорости в волне для пороха Н+2% MgO совпадало с пороговой величиной  $v_{эф}$  ( $\sim 30$  м/с), определенной при  $f=1300$  Гц. Повышение частоты колебаний с 1300 до 1800 Гц приводит к эффекту, хотя и весьма слабому, динамической эрозии (рис. 3, 2). Влияние частоты акустических колебаний скорости потока на  $\varepsilon_g$  более отчетливо проявилось в составе Н+0,5% графита, где величина  $v_{эф}=85$  м/с была, по-видимому, выше порогового значения. Отметим, что пороговое значение стационарного потока для этого топлива равно 100 м/с. Двукратное увеличение частоты привело к возрастанию коэффициента динамической эрозии на  $\sim 10\%$  (рис. 3, 1).

Интересно поведение скорости горения катализированного пороха Н+2,5% РbО. При изменении рабочих параметров: среднего давления в камере  $p_0=30-40$  ат (3-4 мм/м<sup>2</sup>), частоты колебаний  $f=950-1800$  Гц,  $v_{эф}=95-220$  м/с — коэффициент динамической эрозии практически не отличался от единицы (см. рис. 2, 5; рис. 3, 3). Тем не менее, в местах, соответствующих пучности акустической скорости, возникала ярко выраженная рябь. В пучности же акустического давления средняя по времени скорость горения этой рецептуры  $u'$  уменьшилась по сравнению с величиной стационарной скорости горения  $u_0$ .

На рис. 4 представлены экспериментальные значения коэффициента  $k=u'/u_0$  в зависимости от  $p_0$  для составов Н+2% MgO (1) и Н+2,5% РbО (2). Везде  $k < 1$ , что говорит о «пригасании» порохов в пучности давления стоячей волны. Наибольшим замедлением обладает композиция Н+2,5% РbО. Скорость горения тем ниже, чем больше относительная величина акустического давления  $\bar{p}/p_0$ .

Увеличение скорости горения в пучности скорости акустической волны, вероятно, происходит за счет возрастания коэффициента тепло-

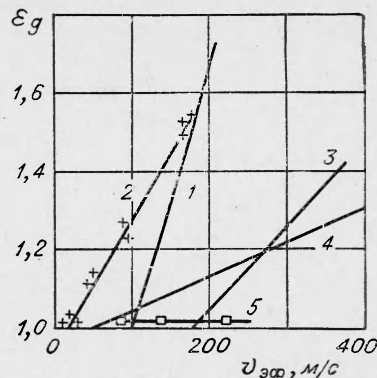


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической эрозии от эффективной скорости колебаний газового потока.

1 — Н+2% MgO (стац.),  $p_0=70$  ат (7 Мн/м<sup>2</sup>); 2 — Н+2% MgO (динамич.),  $p_0=40$  ат (4 Мн/м<sup>2</sup>),  $f=1300$  Гц; 3 — JPN (динамич),  $p_0=77$  ат (7,7 Мн/м<sup>2</sup>),  $f=4200$  Гц [1]; 4 — JPN (статич.),  $p_0=70$  ат (7 Мн/м<sup>2</sup>); 5 — Н+2,5% РbО,  $p_0=30$  ат (3 Мн/м<sup>2</sup>),  $f=950$  Гц [1].

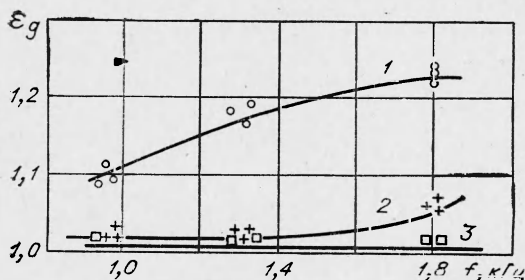


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамической эрозии от частоты колебаний ( $p_0=40$  ат (4 Мн/м<sup>2</sup>)).

1 — Н+0,5% графита,  $v_{эф}=85$  м/с; 2 — Н+2% MgO,  $v_{эф}=30$  м/с; 3 — Н+2,5% РbО,  $v_{эф}=95$  м/с.

проводности газообразной среды при турбулизации ее акустическими волнами. Отметим, что для турбулизации жидкости или газа обычно достаточно интенсивности колебаний  $I=10$  Вт/см<sup>2</sup> ( $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>) [3]. В наших опытах в поле стоячей волны понятие «интенсивности» звука теряет силу, поскольку здесь нет потока акустической энергии. Однако на практике часто условно используют единицы измерения интенсивности колебаний. В камере

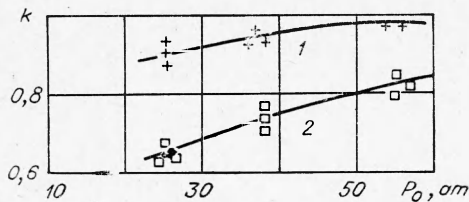


Рис. 4. Изменение скорости горения в пучности давления стоячей акустической волны ( $p = 10$  ат,  $f = 1300$  Гц).

необходимой для достаточного, в смысле ее воздействия на скорость горения пороха, возрастания потока тепла из газовой в конденсированную фазу. Причина  $v_{эф*} < v_*$  может состоять в том, что звуковые волны способствуют более быстрой потере гидродинамической устойчивости потока и действуют более эффективно, чем в случае простого увеличения скорости стационарного течения [3, 4].

Из данных рис. 3 следует, что с ростом частоты колебаний наблюдается весьма слабое увеличение коэффициента динамической эрозии. Этот факт согласуется с результатами исследования теплообмена в турбулентном погранслое [5], поскольку с ростом частоты происходит интенсификация этого процесса. С другой стороны, известно [6], что тол-

щина динамического погранслоя  $\delta \sim \sqrt{\frac{\nu}{\pi f}}$ , где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости газа, и при  $\nu = 0,15$  см<sup>2</sup>/с и  $f = 1300$  Гц,  $\delta \sim 60$  мк, что по порядку величины совпадает с протяженностью зоны горения в газовой фазе исследованных порохов. Уменьшение толщины погранслоя с ростом частоты колебаний должно способствовать возрастанию теплового потока к поверхности пороха и повышению скорости горения. Нечувствительность скорости горения состава Н+2,5% РbО к колебаниям газового потока, возможно, объясняется тем, что ведущая стадия горения находится в конденсированной фазе зоны дефлаграции этой рецептуры. Например, в работе [7] установлено, что введение в состав пороха Н свинцового катализатора (1% силицилата свинца) ускоряет химические реакции разложения и превращения твердой фазы в газообразную на ранних стадиях горения.

В результате опытов выяснено, что пороговое значение акустической скорости, вызывающей динамическую эрозию, оказывается ниже порогового значения скорости стационарного потока, приводящего к обычному процессу раздувания. С ростом частоты колебаний наблюдается увеличение  $\epsilon_g$ . Зависимость  $\epsilon_g(f)$  весьма слабая. Величина коэффициента  $\epsilon_g$  возрастает с увеличением интенсивности колебаний. Причина увеличения скорости горения пороха в пучности акустической скорости стоячей волны может состоять в акустической турбулизации продуктов сгорания и возрастании коэффициентов переноса. Скорость горения состава Н+2,5% РbО оказалась нечувствительной к колебаниям скорости. Возможная причина этого явления — слабая зависимость закономерностей горения от процессов в газовой фазе зоны дефлаграции.

В пучностях акустического давления существует тенденция к уменьшению средней во времени скорости горения.

Поступила в редакцию  
24/IX 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крамп, Прайс. РТ, 1961, 7.
2. Крамп, Прайс. РТнК, 1964, 7.
3. Е. П. Медников. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М., Изд. АН СССР, 1963.

4. В. А. Красильников. Звуковые и ультразвуковые волны. М., Физматгиз, 1960.
5. В. Е. Накоряков и др. Тепло- и массообмен в звуковом поле. Новосибирск, 1970.
6. Ю. Я. Борисов, Ю. Г. Статников. Акустический ж. 1966, 12, 3.
7. В. М. Мальцев, М. Саммерфильд. ФГВ, 1973, 9, 1.

УДК 541.128+662.222

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОГАШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАТАЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО СОСТАВА ПХА — ПММА

*О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко, А. Г. Терещенко,  
Н. Н. Коломийчук  
(Новосибирск)*

В последнее время опубликован ряд работ [1—4] по изучению механизма горения смесевых твердых топлив (СТТ) на основе ПХА и полимерного связующего с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). В этих работах путем исследования структуры затушенных поверхностей образцов ПХА и топлив на его основе установлены факты важные для понимания механизма горения СТТ. В работе [5] этот метод применен для изучения механизма действия катализатора при горении ПХА и СТТ на его основе и отмечено накопление и агломерация частиц катализатора  $Fe_2O_3$ , образование каркаса из этих частиц на поверхности горения, образование выемок вокруг частиц катализатора  $SiO$ , указывающее на протекание подповерхностных каталитических реакций в конденсированной фазе.

Настоящая работа является продолжением и развитием работы [5] и посвящена дальнейшему исследованию механизма катализа горения модельной системы ПХА — ПММА (полиметилметакрилат) с помощью СЭМ, изучению влияния различных факторов: давления, дисперсности ПХА, дисперсности катализатора  $Fe_2O_3$ .

Образцы, горящие при повышенном давлении (40 атм) в бомбе постоянного объема Б-150, гасились путем резкого сброса давления при разрыве диафрагмы (металлической фольги в окне бомбы) с помощью заостренного стержня, толкаемого мощной пружиной. Образцы, горящие при 1 атм, гасились так же, как описано в [5]. Поверхности затушенных образцов топлива исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (Cambridge Instrument Company Stereoscan), обладающего высоким увеличением с большой глубиной резкости.

В работе использовались смеси ПХА (дисперсность ПХА варьировалась) с ПММА (дисперсность  $\sim 3$  мк) стехиометрического состава. Катализатор  $Fe_2O_3$  с различной удельной поверхностью вводился в количестве 2%. Методика приготовления образцов аналогична использованной в [5].

**Топлива с крупнодисперсным ПХА.** На рис. 1, а, б и рис. 2, а, б показана структура поверхности горения образцов топлива с ПХА (250÷400 мк) без катализатора (рис. 1) и с катализатором  $Fe_2O_3$  ( $S_{уд}=0,4$  м<sup>2</sup>/г), затушенных при 1 атм. Из рис. 2 видно, что на поверхности горения накапливаются агломераты частиц катализатора размером  $\sim 20$  мк (размер исходных частиц катализатора в топливе  $\sim 4$  мк). В соответствии с данными работ [1—4] поверх-