

3. Т. И. Алексеева, М. А. Гуревич, А. М. Степанов, ФГВ, 1973, 9, 5.
4. Б. И. Хайкин, Э. Н. Руманов, ФГВ, 1975, 11, 5.
5. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.

ЭРОЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. Н. Виллюнов, Ю. М. Исаев, Л. Н. Ревягин

(Томск)

При наличии акустических колебаний газа в потоке над горячей поверхностью конденсированного вещества изменяется скорость горения [1]. Отношение скорости горения в пучности акустической волны к скорости горения без колебаний в неподвижной среде продуктов сгорания называют коэффициентом динамической эрозии. В стоячей акустической волне значения скорости горения, соответствующие пучности и узлу акустической скорости (место пучности колебательного давления), отличаются. Изучению процесса горения конденсированных веществ в акустическом поле посвящены экспериментальные работы [1—3]. В результате исследований установлено, что

1) величина коэффициента динамической эрозии в пучности акустической скорости возрастает с увеличением интенсивности колебаний [1, 2];

2) в пучности давления стоячей волны скорость горения конденсированных веществ уменьшается по сравнению с нормальной скоростью горения, и скорость горения тем меньше, чем больше амплитуда колебаний давления [1—3];

3) зависимость коэффициента динамической эрозии от частоты слабая, и замечена тенденция к некоторому увеличению скорости горения с увеличением частоты [2].

Хотя исследованием условий возникновения и гашения колебаний занимались многие авторы, но работ о взаимном влиянии звукового поля и процесса горения пока недостаточно.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования эрозионного горения двух медленногорящих составов конденсированных веществ А и В в акустическом поле. Поскольку пороговая скорость стационарной эрозии этих составов меньше, чем у веществ, исследованных ранее [1—3], то возник вопрос: можно ли пренебрегать влиянием средней скорости потока на скорость горения при наличии акустических колебаний. Можно ли вообще исключить из рассмотрения воздействие стационарного потока, движущегося вдоль поверхности горения? Поэтому сделана попытка провести анализ экспериментальных результатов с учетом эффекта стационарной эрозии.

Опыты проводились при давлении 4,5 МПа и температуре 18°C в двухсекционной камере Прайса [1, 2]. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Для определения скорости горения в условиях колебания служит секция III, неустойчивая по отношению к продольным колебаниям. Во всех испытаниях в секции вибрационного горения использовались цилиндрические каналные образцы, забронированные по торцевой и боковой поверхности, с внешним диаметром 38 и внутренним 10 мм. Продукты сгорания истекали через отверстие в боковой стенке образца, совмещенное с отверстием камеры. В зависимости от длины этой секции после воспламенения в ней устанавлива-

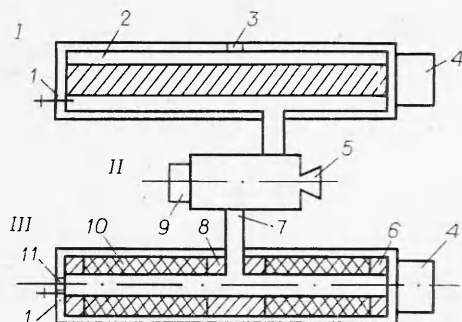


Рис. 1. Принципиальная схема двухсекционной камеры Прайса.

I — контрольная секция; II — акустический фильтр; III — секция вибрационного горения. 1 — запал; 2 — стержневой образец; 3 — гнездо датчика среднего давления; 4 — блок подачи воды; 5 — сопло; 6, 8 — вкладыши исследуемого вещества в пучности скорости и давления; 7 — соединительные патрубки; 9 — блок сброса давления; 10 — цилиндрический образец; 11 — гнездо датчика высокочастотных колебаний.

менее склонного к возбуждению колебаний, чем испытуемое. На одном конце имелось отверстие для пьезодатчика высокочастотных колебаний, на другом — расположен блок подачи воды для гашения образца при сбросе давления.

Контрольная секция I имеет аналогичную конструкцию. В отличие от установки Прайса [1] образец стационарного горения I был не трубчатого, а стержневого типа. Это приводило к надежному деформированию и позволяло свести к минимуму изменение среднего давления в процессе опыта. Как показывают измерения, стационарное давление в обеих частях установки оказывалось одинаковым и равным давлению в полости акустического фильтра II.

Экспериментальные исследования проводились методом прерывания горения, которое необходимо для измерения толщины выгорания свода по длине образца и определения средней по времени величины стационарной скорости горения в секции III и нормальной скорости горения в контрольной секции I. Образцы тушили сбросом давления с одновременной подачей воды. В ходе эксперимента измерялись амплитуда, частота колебаний давления, среднее давление, время работы установки, толщина сгоревшего свода исследуемых образцов. Таким образом, получались все величины, необходимые для определения коэффициента динамической эрозии ε_g . Эксперимент продолжался от 1 до 1,5 с.

Результаты эксперимента. На рис. 2 приведен график зависимости коэффициента динамической эрозии ε_g от длины образца x/λ соответственно для состава А и В при $Re_\lambda = 5,3 \cdot 10^6$ и $f = 1300$ Гц, где x — координата длины вдоль образца, λ — длина стоячей волны, $Re_\lambda = u\lambda/\nu$. Для этих же высокоэрозионных составов, как и для других, указанных в работах [1—3], получено, что в пучности давления скорость горения конденсированных веществ уменьшалась, а в пучности акустической скорости увеличилась по сравнению с нормальным значением, определенным в стандартных условиях без колебаний и среднего потока.

Получено, что с увеличением амплитуды колебаний коэффициент динамической эрозии увеличивается при условии постоянства остальных параметров, что согласуется с ранее полученными результатами [2]. В некоторых случаях скорость среднего движения продуктов сгорания u была выше порогового значения стационарной эрозии, а для состава А

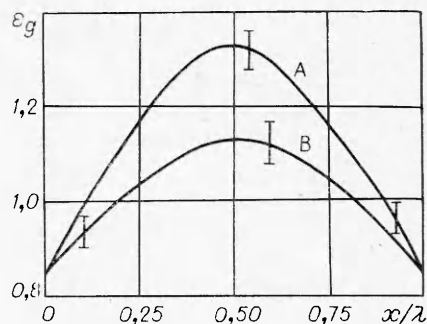


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической эрозии от длины образца.

лись колебания с частотой $f \approx c/2l$, где c — скорость звука в продуктах сгорания, l — длина секции III. Амплитуда колебаний изменялась с помощью вкладышей из другого конденсированного вещества, более или

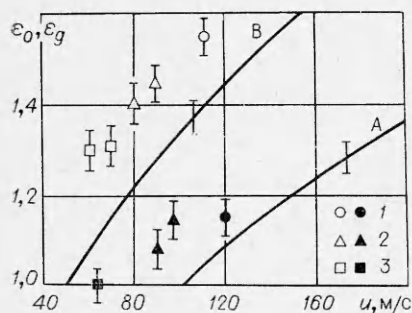


Рис. 3. Зависимости ε_g и ε_0 от средней скорости потока (светлые точки — состав В, темные — А).
1 — 950 Гц, 2 — 1300 Гц, 3 — 1800 Гц.

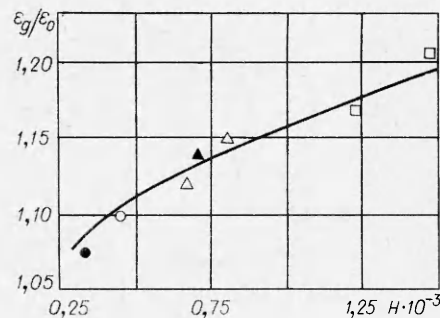


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента эрозии от параметра H .

во всем исследуемом диапазоне она превышала пороговую. Поэтому проведена обработка экспериментальных данных не только от общепринятых амплитудных или эффективных значений акустической скорости в волне, но и с учетом средней скорости потока.

На рис. 3 приведены экспериментальные значения коэффициентов динамической ε_g и стационарной ε_0 эрозии в зависимости от средней скорости потока u . Скорость u в данном сечении находилась из уравнения сохранения массы. Причем величины ε_0 получены в установке для изучения эрозионного эффекта по методике [4]. Кривыми обозначены $\varepsilon_0(u)$ для стационарной эрозии, а точками — значения коэффициентов динамической эрозии для соответствующих средних скоростей потока в пучности акустической скорости u' . Эффективное значение u' для всех точек равнялось 30 м/с.

С увеличением средней скорости потока коэффициент динамической эрозии увеличивается, а относительное изменение скорости горения, т. е. отношение коэффициента динамической эрозии к коэффициенту стационарной эрозии ($\varepsilon_g/\varepsilon_0$), уменьшается с увеличением средней скорости потока.

Если предположить, что увеличение скорости горения в пучности скорости стоячей волны происходит из-за роста коэффициента теплоотдачи, а следовательно, и теплового потока из газовой фазы к поверхности горения за счет интенсификации процессов теплообмена акустическими колебаниями скорости потока в канале горящего конденсированного вещества, то для анализа полученных опытных данных можно использовать результаты теоретического и экспериментального исследования теплообмена в звуковом поле, приведенные в [5]. В этой работе получено, что наиболее сильное влияние на теплообмен в турбулентном пограничном слое с наложенной звуковой волной оказывает параметр

$$H = [b^2/u^2 \cdot \text{Re}_\lambda^{-0,3} \sqrt{M} (x/\lambda)^{0,2}],$$

где b — амплитуда скорости частиц среды в акустической волне; u — стационарная составляющая скорости потока; $M = u/\omega\lambda$ — число Маха; ω — круговая частота колебаний. Результаты экспериментального исследования теплообмена в турбулентном пограничном слое при резонансных колебаниях потока [5] обрабатывались в виде зависимости относительного коэффициента теплоотдачи от H

$$\text{Nu}/\text{Nu}_0 = F(H),$$

где Nu — критерий Нуссельта, определяющий коэффициент теплоотдачи

в акустическом поле; Nu_0 — критерий Нуссельта при отсутствии звуковых колебаний.

Функциональная зависимость максимума теплоотдачи от параметра H по результатам всех экспериментов выражается формулой

$$Nu/Nu_0 = 1 + 2,2\sqrt{H} + 2,2H.$$

Максимум теплоотдачи лежит в области пучности скорости звуковых колебаний.

Комплекс H применен в [5] для обработки экспериментальных результатов по определению коэффициента теплоотдачи к стенкам трубы, в которой продувался газ с наложенными звуковыми колебаниями на скорость потока. Этот комплекс можно применить для обработки результатов по эрозионному горению конденсированных веществ, где имеет место вдув и химические реакции, используя допущения [6], что касательное напряжение трения при горении в потоке совпадает с напряжением трения на стенке пластины, так как из теории пограничного слоя следует, что вдув массы газа из стенки пористого канала уменьшает, а отвод от потока тепла в стенку увеличивает сопротивление трения. При горении конденсированных веществ оба фактора существуют одновременно и в известной мере компенсируют друг друга.

Сделана обработка экспериментальных результатов для составов А и В в зависимости от этого параметра. На рис. 4 приведены значения относительного коэффициента эрозии ϵ_g/ϵ_0 как функции величины H (обозначены точками). Эти экспериментальные значения, обработанные методом наименьших квадратов, можно аппроксимировать с точностью $\pm 3\%$ формулой

$$\epsilon_g/\epsilon_0 = 1 + 5 [b^2/u^2 \cdot Re_\lambda^{-0,3} \sqrt{M}(x/\lambda)^{0,2}]^{0,5}. \quad (1)$$

Вид этой зависимости представлен сплошной линией на рис. 4. Характер поведения аналогичен зависимости $Nu/Nu_0 = F(H)$, полученной в [5]. Из графика на рис. 3 нельзя выделить характер зависимости коэффициента динамической эрозии от параметров акустического поля. Зависимость же (ϵ_g/ϵ_0) от H позволяет представить, каким образом коэффициент динамической эрозии изменяется с изменением амплитуды и частоты колебаний в отдельности.

Из формулы (1) следует, что величина $(\epsilon_g/\epsilon_0 - 1) \sim b$, т. е. пропорциональна амплитуде колебаний. Этот вывод согласуется с результатами данного экспериментального исследования и работ [1, 2]. По (1) $(\epsilon_g/\epsilon_0 - 1) \sim f^{0,25}$, такая же зависимость от частоты получена для коэффициента теплоотдачи в звуковом поле в [7]. Эти результаты согласуются с выводами работы [2] о слабой связи коэффициента динамической эрозии с частотой колебаний. Полученная функциональная зависимость относительного коэффициента эрозии от параметра H позволяет проводить анализ и предсказывать скорости горения конденсированного вещества при наличии колебаний в потоке газов. Она окажется полезной для оценок устойчивости акустического поля и возможного повышения давления в камере сгорания в случае вибрационного режима работы последней.

Поступила в редакцию
15/IV 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Price. AIAA J., 1964, 7.
2. Ю. И. Медведев, Л. Н. Ревягин. ФГВ, 1974, 10, 3.
3. В. Н. Федоров. ФГВ, 1976, 12, 4.
4. В. И. Вплюнов, А. А. Дворяшин. ФГВ, 1971, 7, 1.

5. В. Е. Накоряков, А. П. Бурдюков и др. Тепломассообмен в звуковом поле. Новосибирск: Наука, 1970.
6. В. Н. Вилунов. Докл. АН СССР, 1963, 136, 2.
7. E. H. Perry, F. E. C. Culick. Comb. Sci. Techn., 1974, 9.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ С АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Д. И. Абугов, О. И. Обрезков, В. П. Пикалов

(Москва)

В проблеме неустойчивости горения в форсированных камерах сгорания особенно сложным и наименее изученным вопросом является определение механизмов обратной связи, т. е. воздействия акустических колебаний на скорость горения, определяющего возможность усиления колебаний давления [1, 2]. Хотя влияние среднего давления на скорости распространения ламинарного и турбулентного пламени известно [3], но в условиях быстроменяющегося давления квазистационарный подход к определению реакции процесса горения на колебания, не учитывающий конечных скоростей физико-химических процессов, может привести к ошибочным результатам. Наиболее правильное представление о взаимодействии горения с акустическими колебаниями может дать частотная характеристика отклика пламени на гармонические возмущения, позволяющая выяснить особенности механизма усиления колебаний давления при различных частотах. Некоторые теоретические исследования в этом направлении представлены в [2, 4]. В настоящей работе изложены результаты экспериментального исследования взаимодействия процесса горения газов с искусственно создаваемыми акустическими колебаниями и дан качественный анализ полученных результатов.

Эксперименты проводились в модельной камере сгорания квадратного сечения 50×50 и высотой 1000 мм (рис. 1). Через нижнее днище подавались газообразные горючие (пропан, аммиак) и окислитель (воздух, кислород). Компоненты топлива вводились как отдельно, так и предварительно перемешанными. В камере осуществлялись ламинарный и турбулентный режимы горения топлива. При горении неперемешанных газов горючее поступало в камеру через шесть трубок, а окислитель — через сорок два отверстия в днище (сгруппированные по семь у каждой трубки горючего). При ламинарном горении однородной смеси последняя поступала в камеру через шесть трубок. Турбулентное горение происходило в одиночных горелках на стабилизаторах — турбулизаторах пламени, выполненных в форме конусов и сеток. При горении на конусном стабилизаторе пламя имело торроидальную форму, а на сетке — форму конуса.

Во всех экспериментах высота пламени была значительно меньше четверти длины акустической волны. Для исключения влияния колебаний в камере на подачу газов в подводящих трубках устанавливались акустические разделители — пористые пластины толщиной 6 мм. У нижнего днища камеры располагался датчик давления и имелись окна для оптических измерений и наблюдений за пламенем. Горение протекало при атмосферном давлении, продукты сгорания отводились через два боковых отверстия диаметром 10 мм на половине высоты камеры. Акустические колебания создавались в камере электродинамическим излучателем, установленным у верхнего днища камеры. Мембрана излуча-