

Рис. 1. Зависимость скорости горения смесей от давления.
1 — $\text{KClO}_4 + 4 \text{Ca}$; 2 — $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{Ca}$;
3 — $2 \text{KNO}_3 + 5 \text{Ca}$.

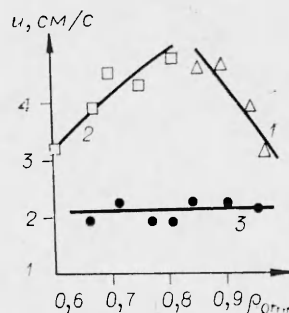


Рис. 2. Зависимость скорости горения смесей от их плотности при 15 атм (обозначения аналогичны рис. 1).

Ход зависимости $u=f(p)$ смеси с Fe_2O_3 совершенно аналогичен зависимости железо-алюминиевых и железо-магневых термитов [3], выход на плато кривой $u=f(p)$ свидетельствует о том, что ведущая стадия горения протекает без участия газовой фазы, и она сводится, вероятно, к взаимодействию расплавленного кальция с окисью железа. Вид кривой $u=f(\rho)$ (см. рис. 2) показывает, что уплотнение смеси улучшает контакт кальция с Fe_2O_3 и соответственно увеличивает скорость горения.

Смесь с KNO_3 характеризуется наименьшей из трех изученных систем скоростью; $T_{\text{плKNO}_3} = 340^\circ\text{C}$. Однако при этих температурах ни вспышки, ни экзотермической реакции (по данным ДТА) в смеси не наблюдалось. Дополнительные эксперименты показали, что кальций не реагирует с расплавом KNO_3 вплоть до температуры ее разложения (больше 400°C). При более высоких температурах плавится и испаряется кальций, скорость реагирования его паров с продуктами разложения KNO_3 в газовой фазе прямо зависит от давления, и эта стадия может быть ведущей. Температура плавления KNO_3 существенно ниже температуры поверхности горения, это приводит к образованию широкого слоя расплава, поэтому зависимости скорости горения от плотности нет (см. рис. 2).

Таким образом, горение кальция в пиротехнических смесях подчиняется общим закономерностям горения конденсированных смесей, однако его отличает более высокий уровень скоростей.

Поступила в редакцию
11/VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. У. Улкинсон. Получение тугоплавких металлов. М., Атомиздат, 1975.
2. Р. Рипан, И. Честяну. Неорганическая химия. Т. 1. М., Мир, 1972.
3. Н. Н. Бахмап, А. Ф. Белыев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., Наука, 1967.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ЭРОЗИОННОМ ГОРЕНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

В. И. Вилюнов, Ю. М. Исаев, А. Т. Кузнецов
(Томск)

Поток, протекающий параллельно горячей поверхности конденсированного вещества, изменяет его линейную скорость горения. Это явление, открытое О. И. Лейпунским и Я. Б. Зельдовичем, названо раздуванием или, по современной терминологии, эрозией. Возникают вопросы, как структура потока изменяет скорость горения, следует ли ее учитывать при масштабном переносе, на какие расстояния от

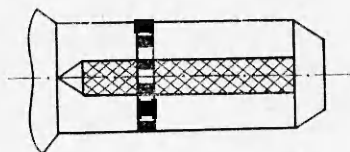


Рис. 1. Эрозионный насадок.

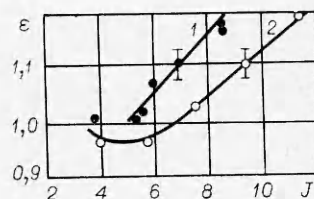


Рис. 3. Зависимость $\epsilon(J)$ для конденсированного вещества N_2 .
1 — за турбулизатором 2; 2 — перед турбулизатором.

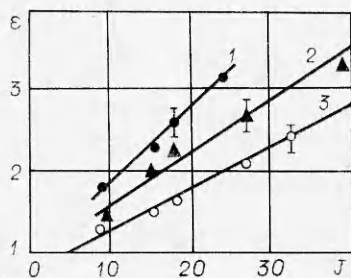


Рис. 2. Зависимость $\epsilon(J)$ для конденсированного вещества N_1 .
1 — за турбулизатором 2; 2 — за турбулизатором 1; 3 — перед турбулизатором.

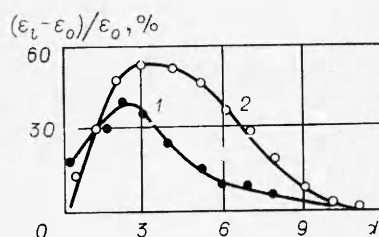


Рис. 4. Зависимость эрозионного отношения от длины за турбулизатором 2 для конденсированных веществ N_1 (1) и N_2 (2).

возмущающего фактора распространяется это влияние? Для ответа на эти вопросы в настоящей работе проведены опыты, которые позволили качественно оценить, провести анализ и сделать некоторые рекомендации по учету влияния структуры турбулентности на эрозионное горение.

Опыты проводились на лабораторной установке, принципиальная схема которой приведена в работе [1]. Продукты горения, образующиеся в камере сгорания от основного заряда и контрольного образца, горящих при постоянном давлении, воздействуют на исследуемые образцы, которые разделены турбулизирующей решеткой в эрозионном насадке (рис. 1). Обработка опытных данных проводилась по методике, изложенной в работах [1, 2]. Кроме осредненных значений коэффициента эрозии рассчитывались локальные значения этого параметра по длине образца за турбулизатором. Измерения диаметров образцов в каждом сечении проводились до и после опыта с шагом 2 мм вдоль оси канала на микроскопе ММИ-2.

Для получения различных уровней турбулентности в потоке применялись турбулизаторы двух типов [3]:

- а) турбулизатор 1 — ортогональная сетка, собранная из прутков, образующих квадратные отверстия с размером ячейки 2,5 мм и диаметром прутка 0,5 мм;
- б) турбулизатор 2 — решетка из перфорированной пластины толщиной 3 мм, с диаметром отверстия $d=2,5$ мм и расстоянием между отверстиями 2,5 мм.

Турбулизаторы устанавливались в эрозионном насадке с внутренним диаметром $D=20$ мм. Отношение живого сечения к полному для турбулизатора 1 равно 0,78, для 2 — 0,47.

Изучалось эрозионное горение конденсированного вещества N_1 и N_2 (с катализаторами). Для получения осредненных значений коэффициента эрозии ϵ по длине канала до и после решетки использовались цилиндрические, заборонированные с торцов образцы диаметром 8—10 и длиной 30 мм, а для локального исследования влияния структуры турбулентности на горение применялись цилиндрические образцы диаметром 8 и длиной 120 мм, 1/4 часть которых устанавливалась до решетки.

Результаты опытов представлены на рис. 2, 3 в виде зависимости $\epsilon = v_u/v_0$ от параметра $J = u\rho/\lambda/v_0\rho_0$. Здесь v_u — скорость горения конденсированного вещества в потоке; v_0 — нормальная скорость горения; u — скорость потока; ρ — плотность газа; ρ_0 — плотность конденсированного вещества; λ — коэффициент сопротивления. Опыты проводились при давлении 50 атм. Величина параметра J варьировалась в пределах $1 < J < 40$, что соответствует изменению скорости потока от 12 до 300 м/с.

Из рис. 2 видно, что осредненное значение коэффициента ϵ на 20—30% больше за турбулизатором 2 и на 10—15% за турбулизатором 1. Если для конденсирован-

ного вещества H_2 с ярко выраженной отрицательной эрозией в некотором диапазоне параметра J перед решеткой скорость горения уменьшается по сравнению с нормальной скоростью горения (без обдува), то за турбулизатором при этих же параметрах J $\varepsilon \geq 1$ (рис. 3).

На рис. 4 представлен график зависимости $(\varepsilon_l - \varepsilon_0)/\varepsilon_0$ от безразмерной длины (x/d) вдоль образца, где ε_0 — коэффициент эрозии образца, находящегося перед решеткой; ε_l — локальное значение коэффициента эрозии за турбулизатором 2; d — диаметр отверстий турбулизатора. За турбулизаторами локальные значения эрозионной скорости выше, чем осредненные по длине образца.

Изменение характеристик потока за турбулизаторами вызывает изменение эрозионной скорости горения по потоку. Полученные данные хорошо согласуются с графиками затухания турбулентности за решетками при инертных продувках, поэтому зависимость для коэффициента эрозии можно связать с уровнем турбулентности

$E = \sqrt{\bar{u}'^2} / u$. Уровень турбулентности за турбулизаторами, согласно измерения [4, 5], сначала увеличивается, а затем, достигнув предельного значения E_{\max} , начинает уменьшаться. Расстояние от турбулизатора x_{\max} , где интенсивность турбулентности достигает своего наибольшего значения, определяется величиной d и в некоторой степени взаимным расположением и формой отверстий. Так, для турбулизатора 2 при инертных продувках получено, что $x_{\max} = (2 \div 3)d$ [4]. За турбулизатором с таким же живым сечением зависимость $(\varepsilon_l - \varepsilon_0)/\varepsilon_0$ от x/d имеет такой же вид (см. рис. 4): $x_{\max} = 2d$ для H_1 и $x_{\max} = 3d$ для H_2 . Турбулентность потока, прошедшего через решетку, на начальном участке неоднородна и неізотропна, преобладают вихри, масштабы и ориентация которых определяются геометрией решетки, что вызывает неравномерное выгорание исследуемого образца на этом участке. На удалении от решетки ($x = 10d$) выгорание становится равномерным с ярко выраженной волновой поверхностью, что можно объяснить преобладанием турбулентных пульсаций в направлении потока.

Для топлив с ярко выраженной отрицательной эрозией (см. рис. 3) за сеткой отсутствует область уменьшения скорости горения при наличии потока газов. Для всех исследованных веществ за турбулизаторами уменьшается пороговое значение параметра J .

Полученные результаты не противоречат современному представлению об эрозионном горении, в котором определяющим является теплообмен между газовой и конденсированной фазой. С изменением интенсивности турбулентного потока изменяется скорость теплообмена между газовой и конденсированной фазой, что отражается на скорости эрозионного горения. Качественные оценки влияния структуры турбулентного потока на эрозионное горение позволяют сделать вывод, что это влияние существенно сказывается только в непосредственной близости за турбулизатором и затухание интенсивности турбулентности происходит быстро вдоль канала, и если в локальной области потока газов происходит значительное изменение структуры турбулентности, то необходимо ввести поправку в расчетах с учетом полученных зависимостей.

Поступила в редакцию
2/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Виллюнов, А. А. Дворяшп. ФГВ, 1971, 7, 1, 45.
2. В. Н. Виллюнов. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2, 381.
3. А. С. Сукомел, В. И. Величко, Ю. Г. Абросимов. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах. М., Энергия, 1979.
4. И. И. Галун, Ю. А. Иванов. ИФЖ, 1969, XVI, 5, 905.
5. Ю. А. Иванов. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, 1, 36.

СТАЦИОНАРНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО ЛОКАЛИЗОВАННАЯ ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА

Л. К. Мартинсон
(Москва)

Рассмотрим процесс теплопроводности в среде с постоянными теплофизическими характеристиками при наличии в ней распределенных источников тепла, объемная мощность которых зависит от локального значения температуры среды. Такой процесс в одномерном случае описывается квазилинейным параболическим уравнением [1]

$$\partial u / \partial t = a \cdot \partial^2 u / \partial x^2 + f(u). \quad (1)$$