

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2011 г.

А.А. Васильев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский госуниверситет

gasdet@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассматривается состояние в химике детонационной волны (ДВ) как исходное состояние для дефлаграционного горения за ударным фронтом ДВ. Предложена формула для скорости горения в зависимости от исходных параметров смеси. Установлено, что основной вклад в скорость горения дает влияние начальной температуры, зависимость от давления весьма слабая.

Ключевые слова: горение, скорость пламени, переход горения в детонацию.

Нормальная скорость ламинарного горения определяется процессами диффузии и теплопроводности, и для корректного их моделирования необходимо иметь информацию о зависимости этих коэффициентов от параметров среды, постоянно меняющихся в процессе ускорения пламени. Очевидно, что для корректного математического моделирования процесса ускорения пламени после его воспламенения необходимы не только физически обоснованные модели турбулизации течения, но и корректные в широком диапазоне изменения основных газодинамических параметров зависимости всех основных коэффициентов, определяющих развитие процесса.

До сих пор традиционно зависимость скорости пламени W от давления P и температуры T задается в виде эмпирического соотношения (с большой степенью неопределенности):

$$W = W_{00} (P/P_{00})^n (T/T_{00})^m, \quad (1)$$

где индексом 00 отмечены значения параметров при некотором стандартном состоянии, а показатели n и m определяются на основе экспериментальных данных.

Следует отметить, что в величинах экспериментальных значений скоростей пламени существует заметный разброс, обусловленный не только различными методиками определения нормальной скорости пламени (горелка Бунзена, распространение пламени в вертикальной трубе вверх или вниз, расширение сферического пламени в мыльном пузыре или бомбе постоянного объема, горение во встречных потоках горючего и окислителя и т.д.). Часто скорость нормального пламени W пересчитывается через видимую скорость пламени W_* с помощью соотношения

$$W = W_* / \sigma, \quad (2)$$

где σ – степень расширения продуктов сгорания.

К задаче о зависимости скорости горения W от давления и температуры можно подойти с точки зрения детонационных процессов. На $(P-V)$ плоскости ($V = 1/\rho$) исходное и конечные состояния горючей смеси традиционно изображаются с помощью ударной адиабаты (химическая реакция не происходит) и адиабаты продуктов реакции. Рассмотрим детонационную волну относительно точки исходного состояния O . Ударная волна (УВ) переводит газ из состояния O в состояние S , соответствующее химике ДВ, затем начинается химическая реакция, и после ее завершения продукты реакции попадают в точку D . Переход из S в D осуществляется вдоль прямой Михельсона, являющейся касательной к адиабате энерговыделения относительно исходного состояния O . Но прямая Михельсона из O в S одновременно является касательной к адиабате энерговыделения, проведенной из точки S как начальной [1]. Следует уточнить, что адиабаты энерговыделения, построенные относительно точек O и S , не совпадают друг с другом, сохраняется лишь условие и точка касания D . При этом изэнтропа в точке D касается снизу адиабаты энерговыделения, построенной относительно точки O , и касается сверху адиабаты, построенной относительно точки S . Иными словами, точка D соответствует как параметрам детонации относительно исходного состояния O , так и параметрам дефлаграционного горения с исходным состоянием в точке S . Этот взгляд (со стороны детонации на горение) позволяет проанализировать изменение дефлаграционных скоростей в состояниях с различными началь-

ными давлениями и температурами и даже получить аналитическую формулу для скорости дефлаграционного горения в зависимости от P_0 и T_0 .

Для исходного состояния в точке O скорости в точках касания на детонационной и дефлаграционной ветвях связаны соотношением [1]

$$D_D D_{FO} = c_0^2. \quad (3)$$

Для состояния S скорость газа относительно фронта УВ представляет собой скорость дефлаграции, потому можно написать

$$(D_D - u_S) = D_{FS} = \rho_0 D_D / \rho_S = D_D / \sigma_S. \quad (4)$$

Из этих двух формул получается соотношение между скоростями дефлаграционного горения, выражаемое через число Маха УВ и степень сжатия за ней:

$$\frac{D_{FS}}{D_{FO}} = \frac{D_D}{\sigma_S} \frac{D_D}{c_0^2} = \frac{M_0^2}{\sigma_S}. \quad (5)$$

Обращая известное соотношение для давления за фронтом УВ как функцию числа Маха УВ $P = f(M)$:

$$\frac{P}{P_0} = \pi = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \approx \frac{2\gamma M^2}{\gamma + 1} \quad (6)$$

к виду $M = g(P)$, перепишем соотношение между дефлаграционными скоростями, из которого ясно видна линейная зависимость скорости горения от температуры начального состояния горючей смеси:

$$D_{FS} = D_{FO} \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \frac{\pi_S}{\sigma_S} = D_{FO} \frac{\gamma + 1}{\gamma} \frac{T_S}{T_0}. \quad (7)$$

Последняя формула, в принципе, является обоснованием достаточно произвольной формулы (1).

Для проверки последнего соотношения были выполнены расчеты параметров горения и детонации стехиометрических смесей водорода, ацетилена, метана с кислородом и воздухом при варьировании начального давления в диапазоне 0.001–100 атм и начальной температуры в диапазоне 200–1800 К, заведомо перекрывающих области параметров, типичных для моделирования процессов перехода горения в детонацию. Экспериментальные исследования описаны в [2]. Некоторые результаты представлены на рисунках. На рис. 1 показана скорость дефлаграционного горения D_F при различных начальных давлениях горючей смеси (состояние F относительно O).

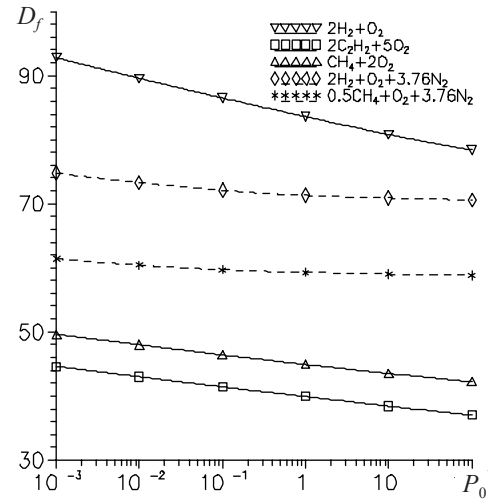


Рис. 1

Скорость дефлаграционного горения D_F при различных начальных температурах горючей смеси (состояние F относительно O) показана на рис. 2.

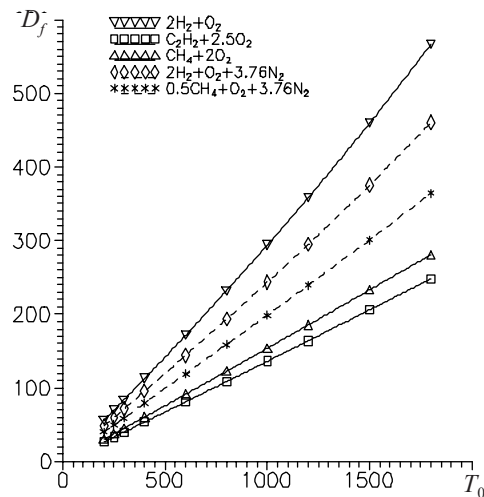


Рис. 2

Работа поддержана РФФИ, ведущей научной школой РФ «Механика ударных и детонационных процессов», Программой РАН «Фундаментальные основы энергетических технологий, включая ВТСП».

Список литературы

1. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Васильев А.А. Экспериментальная оценка скорости горения взрывчатой смеси при повышенных давлениях и температуре // ФГВ. 1992. Т. 28, №4. С. 44–48.

FLAME VELOCITY AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES*A.A. Vasil'ev*

Considering the state of a detonation wave (DW) in a chemical spike as an initial condition for the deflagration process behind the shock front of a DW, a formula for a flame velocity as a function of the initial parameters of a combustible mixture is presented. It was found, that the effect of the initial temperature provides the main contribution to the flame velocity, whereas the effect of the pressure is rather weak.

Keywords: combustion, flame velocity, transition of deflagration to detonation.