

Получены зависимости длины участка перехода конвективного горения в низкоскоростную детонацию от начального размера частиц, пористости заряда, а также установлена линейная связь между длиной участка и характерным временем нарастания давления в зоне горения, которая обобщает эффекты изменения размера частиц, пористости и введения флегматизатора.

Переход конвективного горения в низкоскоростную детонацию связан со сменой механизма инициирования химического превращения и механизма переноса энергии в волне. Определяющими являются процессы, которые протекают в зоне уплотнения, формирующейся перед фронтом пламени по мере роста давления на заключительной фазе развития конвективного горения. Процесс уплотнения сопровождается схлопыванием пор и локальным вязкопластическим разогревом пороха в местах контакта зерен и по поверхности поровых промежутков между ними. Таким образом, при возникновении низкоскоростной детонации в мелкозернистых зарядах определяющими являются диссипативные процессы, протекающие в твердой фазе.

Существенные особенности и отличия выявлены при переходе конвективного горения в низкоскоростную детонацию в случае зарядов из крупных зерен (с размером 3.5мм). Установлено, что в этом случае отсутствует скачкообразное изменение скорости, которая плавно увеличивается от 400м/с до 1300-1500м/с. Анализ фоторазверток процесса показал, что на заключительной фазе развития конвективного горения, так же как и при скоростях процесса 900-1200м/с, традиционно относимых к области низкоскоростной детонации, горящие частицы пороха непосредственно за фронтом воспламенения остаются неподвижными в течение 20-40мкс, и лишь затем ускоряются, достигая скоростей 200-250 м/с. Это означает, что фронт пламени движется впереди зоны уплотнения. Таким образом, воспламенение зерен не связано с течением твердой фазы и контролируется газофазным течением., Речь идет об ином механизме низкоскоростной детонации, который в отличие от процесса, рассмотренного выше, мы назвали "газокомпрессионным".

Итак, в случае мелкодисперсного пороха переход в низкоскоростную детонацию происходит в зоне уплотнения, которая формируется перед фронтом конвективного пламени. В случае крупнозернистого пороха для процесса, который распространяется со скоростями 900-1200м/с и традиционно относится к области низкоскоростной детонации, зона уплотнения располагается позади фронта пламени и, следовательно, не имеет отношения к воспламенению пороха. Более полные представления о механизмах возникновения и развития низкоскоростной детонации и наблюдаемых различиях будут получены после проведения численного моделирования.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

148. МЕХАНИЗМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ

С. М. Фролов, В. Я. Басевич, А. А. Беляев

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва

Стабилизация пламени методом аэродинамической рециркуляции является одним из наиболее часто применяемых способов поддержания горения в высокоскоростном потоке [1]. В [2–4] предложен метод расчета, позволяющий достаточно достоверно определить область устойчивого горения предварительно перемешанной газовой смеси за плохообтекаемыми телами без привлечения экспериментальных данных по стабилизации пламени. В данной работе по модели [2–4] исследуется стабилизация турбулентного диффузионного горения в потоке. Цель работы – изучение механизма стабилизации диффузионного пламени с тем, чтобы сформулировать критерий устойчивости пламени.

Постановка задачи описана в [2–4]. Рассматривается эволюция течения в плоском прямом канале с уголковым стабилизатором после поджига метано-воздушной смеси в рециркуляционной зоне (РЗ). Используются двумерные осредненные уравнения течения, стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, модель горения, основанная на заранее заданной функции плотности распределения вероятностей температуры во фронте пламени, детальный кинетический механизм окисления метана и «неотражающие» краевые условия на открытых границах расчетной области – входном и выходном сечениях канала.

На рис. 1 показаны расчетные поля температуры в канале при разной скорости подачи метана m ($a - m = 2$ мг/с, $b - 15$, $c - 20$, $d - 50$, $e - 100$, $f - 200$). Через входное сечение канала (левая граница) подается воздух со скоростью 10 м/с и интенсивностью турбулентности 2%. Температура воздуха 300 К, начальное давление в канале 1 атм. В канале длиной 1 м и шириной 0,2 м на расстоянии 0,24 м от входного сечения установлен уголкового стабилизатор с углом при вершине 60° и высотой 0,1 м. Струя метана направлена перпендикулярно плоскости рисунка. Стрелка указывает положение ядра струи (0,08 м от вершины, т.е. внутри стабилизатора). Подачу метана моделировали источниковым членом в уравнении неразрывности для топлива. Изотермы на рис. 1 соответствуют равномерному разбиению температурного интервала от 300 К до температуры горения (≈ 2100 К) на 10 участков. Для зажигания топливно-воздушной смеси (ТВС) область за стабилизатором первоначально заполняли горячими продуктами горения. При низких расходах топлива (рис. 1а) состав ТВС находится вне пределов горения («бедный предел»). Увеличение подачи топлива приводит к зажиганию смеси и устойчивому горению на краю застойной зоны внутри стабилизатора (рис. 1б). При дальнейшем увеличении подачи топлива зона горения смещается вниз по потоку (рис. 1с–f). На пределе устойчивого горения (рис. 1f) передний фронт пламени располагается на границе зоны обратных токов за стабилизатором. При увеличении подачи топлива пламя срывается и сносится потоком («богатый предел»). Таким образом, при скорости набегающего потока 10 м/с горение устойчиво при $10 < m < 250$ мг/с. Увеличение скорости воздуха на входе приводит к сужению пределов горения. Например, при расположении точки подачи топлива вне стабилизатора, но внутри РЗ (0,26 см от вершины) горение устойчиво при $25 < m < 160$ мг/с. Смещение точки подачи топлива за пределы РЗ (например, на 0,5 м от вершины) приводило к срыву пламени при любых расходах топлива.

На рис. 2 показано расчетное изменение массы топлива в канале при скорости воздуха 15 м/с, $m = 30$ мг/с, и положении точки подачи топлива 0,26 см от вершины. Сплошная кривая соответствует массе топлива без учета выгорания, штриховая – с учетом выгорания. После стабилизации течения ($t > 25$ мс) в канале имеется большое количество несгоревшего топлива. Отклонение штриховой кривой от сплошной служит мерой для массы сгоревшего топлива. При $t > 30$ мс это отклонение мало отличается от значения скорости подачи топлива m , что свидетельствует о высокой полноте сгорания.

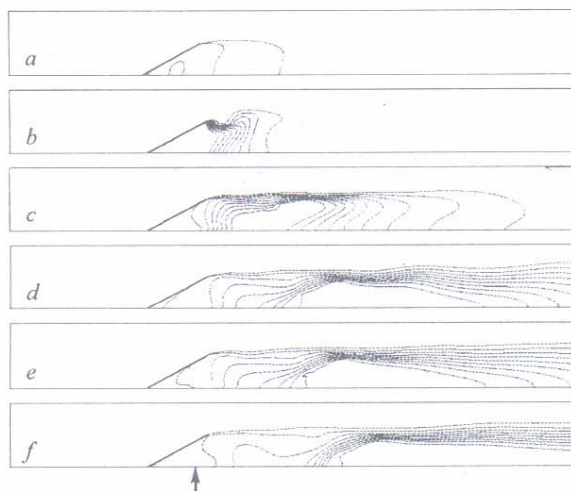


Рис. 1

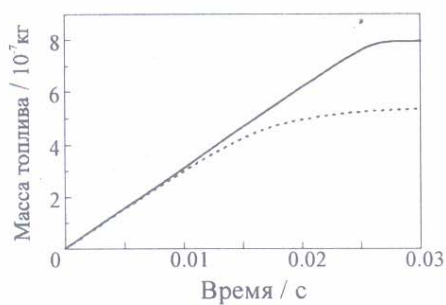


Рис. 2

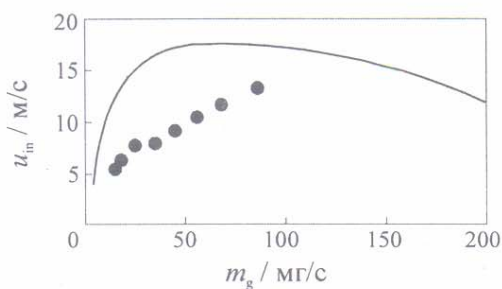


Рис. 3

На рис. 3 приведено сравнение расчетных (кривая) и измеренных (точки [5]) значений предельной скорости воздуха на входе. В экспериментах [5] использовали канал прямоугольного сечения с угловым стабилизатором. Струю метана подавали в область за стабилизатором перпендикулярно боковой стенке канала. Структура течения в [5] имела трехмерный характер: струя метана значительно отклонялась потоком. Согласие расчетных и измеренных результатов — удовлетворительное. В отличие от [5], в расчетах получен богатый предел стабилизации пламени.

Механизмы стабилизации гомогенного [3, 4] и диффузионного горения подобны. Струя топлива смешивается с продуктами горения, поступающими в РЗ благодаря возвратным течениям. В окрестности стабилизатора воздух взаимодействует с прогретым топливом и продуктами горения, заполняющими РЗ. Это взаимодействие сосредоточено в турбулентном слое смешения у внешней границы РЗ. Стабильность горения достигается непрерывным поджиганием формирующейся смеси в определенном месте в слое смешения и поступлением части образовавшихся продуктов сгорания в РЗ. Если следовать вдоль линии тока воображаемой частицы газа, то место поджигания можно характеризовать временем t_c , прошедшим после попадания частицы в слой смешения. При случайном опережении или запаздывании поджигания баланс между оттоком и притоком продуктов горения в РЗ не нарушается при условии, что в нее поступают продукты полного сгорания. При запаздывании поджига выше критического такой баланс нарушается и РЗ более не обеспечивает стабильность горения. Критическое запаздывание поджигания определяется временем t_r , за которое воображаемая частица достигает точки поворота на разделяющей траектории. Таким образом, стабильность горения обеспечена при $Mi = t_r/t_c > 1$, где Mi — число Михельсона. Указанный механизм стабилизации диффузионного пламени отличается от механизма [3, 4] дополнительным требованием: необходимо, чтобы горючая смесь, образующаяся в слое смешения, по своему составу находилась внутри пределов горения.

Работа поддержана РФФИ (грант 99-03-32261) и ФЦП «Интеграция».

1. Раушенбах Б. В., Белый С.А., Беспалов И.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение. 1964.
2. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А. и др. Химическая физика, 1999, 18, 3, 86.
3. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А. Химическая физика, 1999, 18, 8, 50.
4. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А. Химическая физика, 1999, 18, 9, 54.
5. El-Atroush A. A., Litwin T., Wolanski P. Archivum Combustionis, 1996, 16, (3–4), 243.

149. РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ПОРИСТОГО ВВ ВО ВЗРЫВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МНОГОСКОРОСТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ

С.В. Цыкин, Б.Н. Краснов, Ю.В. Янилкин, О.А. Дибиров
РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

При моделировании перехода горения во взрыв в пористых ВВ необходимо учитывать эффекты, связанные со скоростной неоднородностью фаз и проявляющиеся в фильтрации газа в порах и при конвективном горении. Наиболее эффективный и распространенный на сегодняшний день способ непосредственного учета этих, а также других процессов (трение зерен, сжатие пор) при горении пористого ВВ основан на применении методов механики многофазных многоскоростных сред (см., например, [1-4]). При описании горения пористое зернистое ВВ обычно представляется в виде двухфазной среды с зернами твердого ВВ и газовыми продуктами горения. При этом считается, что каждая фаза движется со своей скоростью, а между фазами учитываются обменные эффекты: массо- и теплообмен, трение.

В подавляющем большинстве работ, посвященных численному моделированию перехода горения в детонацию в пористых ВВ, порохах и топливах (и, в том числе, в [1-4]), описывается только одномерная ситуация, что объясняется, по-видимому, сложностью модели и вычислительными трудностями уже в одномерном случае. Вместе с тем, при исследовании перехода горения в детонацию в тонких (диаметром ≈ 1 см) цилиндрических зарядах (поджигаемых с торца), что часто проводится экспериментально [5-7], ввиду значительной длительности процесса (≈ 100 мкс) приходится учитывать двумерные эффекты. На это указывают результаты экспериментов [6,7], согласно которым при