

УДК 534.222.2

СЦЕНАРИИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ГАЗАХ

© 2011 г.

Н.Н. Смирнов

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

ebifsun1@mech.math.msu.su

Поступила в редакцию 16.05.2011

При распространении горения в химически активных смесях, как правило, возможно существование двух принципиально различных режимов распространения: дозвукового и сверхзвукового, что обусловлено различием механизмов активации среды. Наименее изучены и наиболее интересны процессы перехода от одного режима распространения к другому. Изучение перехода горения в детонацию (ПГД) относится к исследованиям в области взрывоопасности газов и паров горючих веществ. Знание механизмов управления возбуждением детонации весьма важно для выработки эффективных мер по предотвращению ПГД в случае возгорания газовой смеси, а также методов по остановке детонационной волны, когда она уже образовалась. Вызывает значительный интерес в этой связи исследование смесей углеводородного топлива с воздухом, поскольку внезапные выбросы горючих природных газов в атмосферу могут иметь очень серьезные последствия. Крайнюю опасность таких выбросов показали аварии в Фликсборо (1974, Великобритания), Мехико (1984, Мексика) и под Уфой (1989, СССР). С другой стороны, преимущества детонационного сжигания топлива по сравнению с медленным горением при постоянном давлении привлекают все большее внимание к пульсирующим детонационным камерам сгорания и их возможному применению для создания двигателей нового поколения. При этом ПГД может стать основой рабочего цикла в пульсирующем детонационном двигателе [1], так что знание механизмов этого процесса и способов управления им позволит существенно сократить преддетонационное расстояние и оптимизировать конструкцию. Представлен обзор последних результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов ПГД в смесях газов. Рассматривается влияние внутренней геометрии и турбулизации потока на возникновение детонации; также обсуждается влияние температуры и концентрации топлива в несгоревшей смеси.

Ключевые слова: горение, детонация, переходные процессы, ударные волны, трубы, камеры.

Экспериментальные исследования показали множественность сценариев перехода горения в детонацию в газах. Рисунки 1, 2 иллюстрируют структуру течения на различных расстояниях от секции, где проходило инициирование. Пламя распространяется слева направо. Шлирен-фотографии демонстрируют $x-t$ диаграмму процесса. Ось x соответствует координате вдоль оси трубы, за начало отсчета принята стенка с впускным клапаном; ось t – ось времени, за точку отсчета принят момент начала регистрации. На рис. 1 изображены волны сжатия перед ускоряющимся турбулентным фронтом пламени.

Детонационная волна возникает вследствие воспламенения смеси в локальных экзотермических центрах («горячих точках») впереди зоны пламени [2, 3]. Сценарий перехода, иллюстрируемый на рис. 2а, характеризуется образованием горячей точки в зоне высокой энтальпии на контактной поверхности, образовавшейся после взаимодействия двух первичных удар-

ных волн [4]. Рисунок 2б демонстрирует переход, возникший при формировании вторичной зоны горения между головной ударной волной и фронтом пламени за счет самовоспламенения локального экзотермического центра. Зона горения расширяется во всех направлениях от горячей точки, и через 180 мкс возникает детонационная волна. На рис. 2в изображен случай, когда возгорание происходит последовательно в нескольких горячих точках перед фронтом пламени. Каждое из этих возгораний непосредственно не приводит к формированию детонационной волны. Пламя, распространяющееся во всех направлениях от горячих точек, приводит к формированию объемного горения и последующему сжатию смеси позади головной ударной волны и возникновению детонационной волны. Возникновение детонации подтверждает наличие ретонационной волны, распространяющейся назад по потоку со скоростью 1350 м/с, которая появляется в верхней части рис. 2в.

Численные исследования процессов ПГД про-

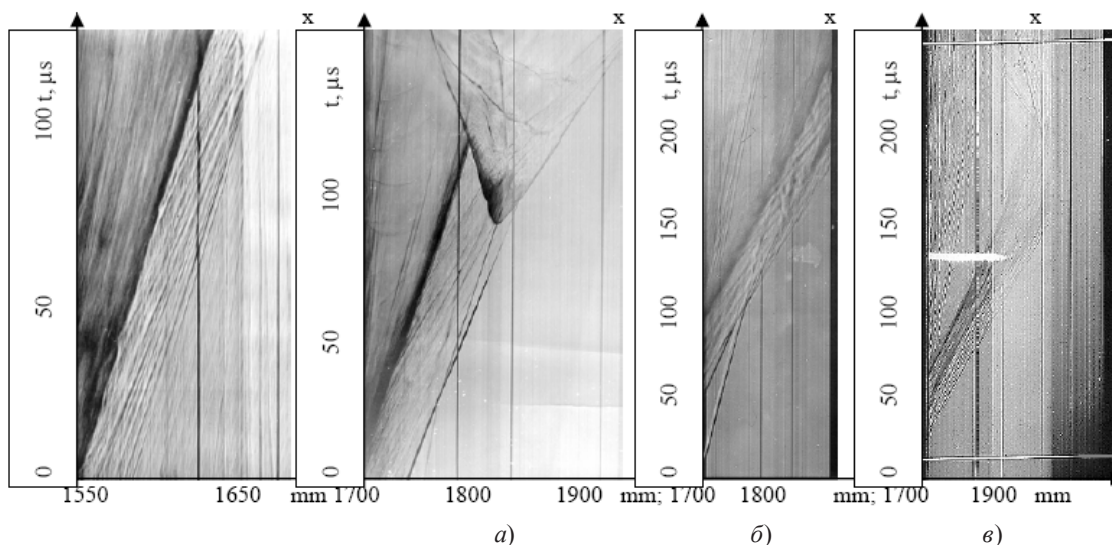


Рис. 1

водились с помощью системы уравнений, полученной осреднением по Фавру системы уравнений движения многокомпонентной смеси. Использовалась модифицированная $k-\epsilon$ модель турбулентности [4]. Для моделирования флуктуаций температуры к основным уравнениям $k-\epsilon$ модели было добавлено третье уравнение, описывающее динамику среднеквадратичного отклонения температуры. Члены, отвечающие за производство и диссипацию этого параметра, а также нелинейные по температуре члены, отвечающие за скорость химических реакций, моделировались с использованием метода квадратур Гаусса. Профиль осредненного по сечению давления вдоль оси X в трубе с двумя форкамерами представлен на рис. 3. Вертикальными линиями отмечено положение камер.

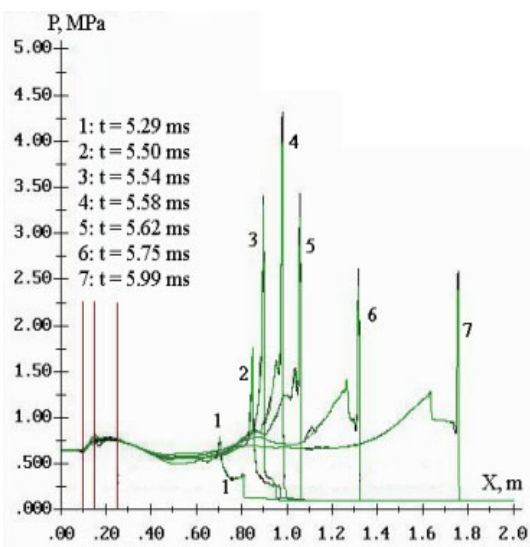


Рис. 3

Анализ результатов показывает, что формирование детонации происходит в одном из экзотер-

мических центров (в «горячей точке»), расположенном в области сжатого газа между головной ударной волной и зоной горения. В зависимости от локальной структуры и расположения горячих точек горение может привести либо к детонации, либо к дефлаграции, распространяющейся от одной из горячих точек.

В зависимости от структуры горячие точки могут служить источниками волн горения или волн детонации. Возникая, волна детонации догоняет головную ударную волну, и после их взаимодействия по несгоревшей смеси распространяется квазиплоская волна сильной детонации, постепенно замедляющаяся до самоподдерживающегося значения скорости Чепмена–Жуге.

Возникающая в горячей точке волна горения распространяется значительно медленнее, что дает время для воспламенения в других горячих точках и, в конечном итоге, может также привести к возникновению волны детонации.

Увеличение числа камер, расположенных в начальной секции трубы, способствует ПГД, пока скорость турбулентного пламени при выходе из последней не превышает скорость звука. Дальнейшее увеличение числа камер препятствует ПГД.

Повышение начальной температуры смеси в трубах с форкамерами большего диаметра способствует ПГД и сокращает преддетонационное расстояние, в то время как в трубах постоянного сечения эффект от повышения температуры может быть строго обратным.

Список литературы

1. Levin V.A., Nechaev J.N., Tarasov A.I. A new approach to organizing operation cycles in pulsed detona-

- tion engines. In: High Speed Deflagration and Detonation / Ed. G.D. Roy, S.M. Frolov et al. Moscow, Elex-KM Publ., 2004. P. 223–238.
2. Merzhanov A.G. On critical conditions for thermal explosion of a hot spot // *Combustion and Flame*. 1966. V. 10. P. 341–348.
3. Oppenheim A.K., Urtiew P.A. Experimental observations of the transition to detonation in an explosive gas // *Proc. Roy. Soc.* 1966. A295. P. 13.
4. Smirnov N.N. et al. Deflagration to detonation transition in gases and its application to pulse detonation devices. In: *Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications* / Ed. G.D. Roy, S.M. Frolov et al. Moscow, ENAS Publ., 1999. P. 65–94.

SCENARIOS OF DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION IN GASES

N.N. Smirnov

The existence of supersonic second combustion mode – detonation – discovered by Mallard et Le Chatelier and by Bertelot et Vieille in 1881 posed the question of mechanisms for transition from one mode to the other. In the period of 1959–1969 experiments, by Salamandra, Soloukhin, Openheim, and their co-workers provided insights into this complicated phenomenon. Since then among all the phenomena relative to combustion processes deflagration to detonation transition is, undoubtedly, the most intriguing one. Deflagration to detonation transition (DDT) in gases is relevant to gas and vapor explosion safety issues. Knowing mechanisms of detonation onset control is of major importance for creating effective mitigation measures addressing the two major goals: to prevent the DDT in case of mixture ignition, or to arrest the detonation wave in case it was initiated. The new impetus to the increase of interest in deflagration to detonation transition (DDT) processes was given by the recent development of pulse detonation devices. The probable application of these principles to creating the new generation of engines put the problem of pulse detonating devices (PDD) effectiveness on top of current research needs. The paper contains the results of theoretical and experimental investigations of DDT processes in combustible gaseous mixtures. In particular, the paper investigates the effect of cavities incorporated in PDD on the onset of detonation in gases. Extensive numerical modeling and simulations allowed studying peculiarities of deflagration to detonation transition in gases in tubes incorporating cavities of a wider cross-section. The presence of cavities essentially affects the combustion modes being established in the device and its dependence on the governing parameters of the problem. The presence of cavities in the ignition section turns the increase of initial mixture temperature into the DDT promoting factor instead of the DDT inhibiting factor.

Keywords: combustion, detonation, transition modes, shock waves, tubes, cavities.