

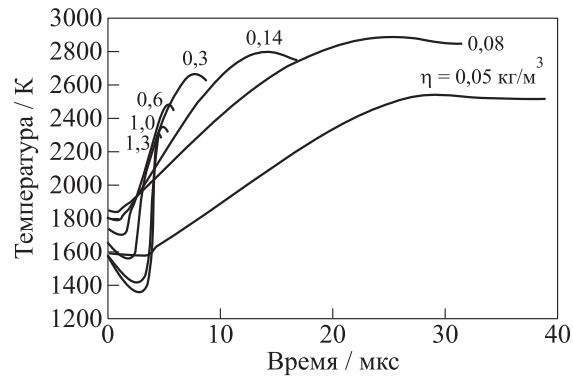
## СТРУКТУРА И ПРЕДЕЛЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ

**С. М. Фролов, В. С. Посвянский**

Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова  
Российская академия наук  
г. Москва

В последние годы возобновился интерес к разработке двигателей и энергетических установок с периодическим сжиганием топлива в бегущей детонационной волне [1]. Наиболее приемлемым способом сжигания топлива в таких устройствах считают гетерогенную детонацию раздробленного жидкого топлива в воздухе. В существующих моделях гетерогенной детонации используют осредненное описание процессов в зоне реакции. Предполагают, что скорость тепловыделения определяется либо скоростью испарения капель (мелкие частицы), либо скоростью дробления капель (относительно крупные частицы), и кинетические особенности реакций окисления горючего вообще не принимают во внимание. В некоторых моделях учитывают существование периода индукции тепловыделения. Для этой цели используют эмпирические соотношения для задержки воспламенения, зависящие от средней температуры газа за ударной волной. Поскольку осредненное описание зоны реакции не вполне учитывает сложные физико-химические процессы, необходимы более точные модели явления, которые позволили бы определить пределы гетерогенной детонации для разных жидких топлив по отношению к начальному составу двухфазной смеси, давлению, температуре, размеру капель и степени предварительного испарения жидкости. Цель работы — предложить уточненную модель структуры и пределов гетерогенной детонации, учитывающую локальное самовоспламенение и диффузионно-лимитированное горение смеси в окрестности капель при переменных осредненных параметрах течения за ударной волной, ведущей детонацию.

Новая модель основана на совместном решении двух задач: (1) задачи об одномерном течении газа за ударной волной с рас-



**Рис. 1** Расчетные зависимости температуры от времени в зоне реакции капельной детонации при разных массовых содержаниях н-гептана. Начальный диаметр капель н-гептана — 5 мкм

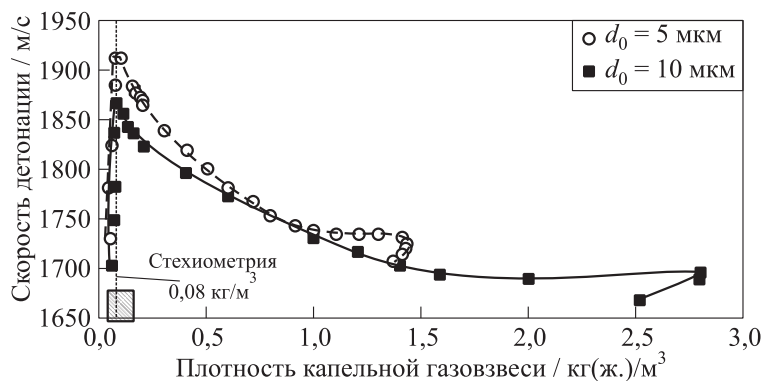
пределенными источниками массы, количества движения и энергии и (2) задачи о самовоспламенении и горении капли горючего в однородной монодисперсной капельной газозвеси [2]. Скоростную неравновесность фаз не учитывали (мелкие капли). С одной стороны, источники массы, количества движения и энергии в уравнениях задачи (1) определяли из решения сопряженной задачи (2), т. е. учитывали локальный характер явлений в окрестности капель. С другой стороны, давление и плотность частиц в газозвеси в задаче (2) определяли из решения задачи (1). Стационарное решение в новой модели существовало, если в конце зоны реакции одновременно выполнялись два условия: средняя скорость течения была равна местной скорости звука и происходила смена знака теплового воздействия распределенных источников на осредненное течение.

Проведены расчеты скорости и структуры гетерогенной детонации для капельных смесей н-гептана в воздухе при нормальных начальных условиях и при разных массовых содержаниях жидкости  $\eta$  в единице объема газозвеси. В расчетах использован многостадийный механизм химических реакций окисления н-гептана [3].

На рис. 1 на примере расчетных зависимостей температуры от времени показана структура зоны реакции в детонационной вол-

не. Момент времени  $t = 0$  соответствует фронту лидирующей ударной волны. В общем случае в структуре зоны реакции можно выделить три характерных периода: (1) период индукции — время до самовоспламенения паров горючего, (2) объемное самовоспламенение некоторого количества накопленных паров горючего и (3) период диффузионно-лимитированного фронтального горения в газовой фазе с одновременным испарением капель. В течение периода индукции средняя температура газа снижается вследствие прогрева капель и их частичного испарения. Вспышка паров горючего происходит на некотором расстоянии от капель и приводит к повышению и локальной, и средней температуры потока. С ростом массового содержания жидкости в газозвеси продолжительность периода индукции увеличивается. Кроме того, увеличивается и степень охлаждения газа в конце периода индукции. Из рис. 1 следует, что при малых массовых содержаниях жидкости (кривые для  $\eta = 0,05, 0,08$  и  $0,14$  кг/м<sup>3</sup>) механизм энергосыделения определяется фронтальным диффузионно-лимитированным горением (третий период), что приводит к относительно длинным зонам реакции на уровне 20–40 мкс. Напротив, при больших массовых содержаниях жидкости (кривые для  $\eta = 1,0$  и  $1,3$  кг/м<sup>3</sup>) механизм энергосыделения определяется объемным самовоспламенением некоторого количества паров горючего (второй период), что приводит к относительно коротким зонам реакции на уровне 5 мкс. При промежуточных массовых содержаниях жидкости (например, кривые для  $\eta = 0,3$  и  $0,6$  кг/м<sup>3</sup>) реализуется смешанный механизм энергосыделения, при котором оба процесса — фронтальный и объемный — вносят приблизительно одинаковый вклад. Другими словами, с ростом массового содержания жидкости изменяется механизм энергосыделения в детонационной волне: на смену фронтальному диффузионно-лимитированному приходит объемный кинетический режим реакции.

На рис. 2 показаны расчетные зависимости скорости детонации от массового содержания жидкости в воздухе при детонации однородных монодисперсных газозвесей *n*-гептана с каплями начального диаметра 5 и 10 мкм. Ширина заштрихованной области на рис. 2 соответствует пределам детонации гомогенной *n*-гептановоздушной смеси. Видно, что гетерогенная капельная детонация имеет значительно более широкий богатый предел:  $\approx 1,5$  кг/м<sup>3</sup>



**Рис. 2** Расчетные зависимости скорости детонации от массового содержания горючего в воздухе при детонации однородных монодисперсных газовзвесей н-гептана с каплями начального диаметра 5 и 10 мкм. Ширина заштрихованной области соответствует пределам детонации гомогенной н-гептано-воздушной смеси

(коэффициент избытка горючего  $\Phi \approx 18$ ) для 5-микронных капель и  $\approx 2,7$  кг/м³ ( $\Phi \approx 34$ ) для 10-микронных капель. Ввиду сильной чувствительности скорости гетерогенной детонации к содержанию горючего в бедных и околостехиометрических смесях, такие смеси, по-видимому, на практике не детонируют (трудно обеспечить однородное распределение капель по пространству). Богатые же смеси, по-видимому, вполне способны детонировать в широком диапазоне коэффициента избытка горючего. Отметим, что богатый предел детонации сужается с уменьшением начального размера капель.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-08-00068).

## Литература

1. Фролов С. М. Импульсные детонационные двигатели. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. 592 с.

2. Фролов С. М., Басевич В. Я. Горение капель / В кн. *Законы горения* // Под ред. Ю. В. Полежаева. — М.: УНПЦ «Энергомаш», 2006. С. 130–159.
3. Басевич В. Я., Фролов С. М. Глобальные кинетические механизмы для моделирования многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // *Химическая физика*, 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.