

## ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ (ТУМАНА)

С. П. Медведев, Б. Е. Гельфанд, А. Н. Поленов, С. В. Хомик

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва, gelfand@podwal.msk.ru

Экспериментально исследовано горение тумана, состоящего из водородовоздушной смеси, водяного пара и ультрадисперсных капель воды. Горючий туман создавался внезапным расширением системы водород + воздух + водяной пар. Показано, что частичная конденсация пара с образованием микрокапель способствует сужению пределов распространения пламени.

Ключевые слова: пределы горения, гетерогенные смеси, волна разрежения, ИК-диагностика.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование горения двухфазных смесей газ + микрокапли имеет два практически важных аспекта. Первый связан с созданием систем «газообразный окислитель + жидкое топливо». Такие системы применяются в ракетных двигателях, топочных агрегатах, а также в камерах сгорания, работающих по дизельному циклу. Для создания облака распыленных капель в технологических устройствах и в лабораторных исследованиях используют различные механические устройства распыления [1]. Исключение представляют опыты в [2], где для формирования микрокапель в виде тумана использовалась камера Вильсона, первоначально заполненная смесью воздуха с парами этанола. Увеличение объема камеры сгорания приводило к расширению исходной смеси и конденсации части паров этанола. Образовавшийся горючий туман состоял из монодисперсных частиц диаметром  $5 \div 7$  мкм, равномерно распределенных по объему. Недостатком установки [2] была ограниченная возможность варьирования степени расширения исходной смеси, а следовательно, и концентрации микрокапель.

Другое направление в исследованиях горения систем газ + микрокапли первоначально было связано с разработкой способов предотвращения пожаров и взрывов в угольных шахтах за счет распыления инертной жидкости (обычно воды) в горючей смеси (метан + воздух). Авария на АЭС Three Mile Island (США, 1979 г.) инициировала ряд исследований горения водородовоздушных смесей [3]. Для по-

давления взрывов водорода рассматривали возможность добавления негорючих газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) или водяного пара [3]. Исследования показали, что для надежного подавления воспламенения и распространения пламени в водородовоздушных смесях концентрация разбавителя ( $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{O}$ ) по объему должна превышать 60 % [3]. При применении азота необходимая концентрация добавки достигала 70 % [3]. Столь значительные уровни разбавления трудно реализуемы и могут оказывать негативное влияние на рабочий объем из-за повышения давления.

Другим способом подавления взрыва газовой смеси, лишенным отмеченного недостатка, является распыление в ней жидкости (воды) в виде облака мелких капель. В [3] отмечено сужение пределов воспламенения водородовоздушных смесей в присутствии распыленной воды. Эффективность взрывоподавления зависела от размера капель. При диаметре капель  $20 \div 50$  мкм (объемная концентрация менее  $10^{-3}$ ) наблюдался небольшой сдвиг нижнего предела распространения пламени: от 4 % по объему водорода в воздухе (в отсутствие капель) до  $4,5 \div 5,3$  %. При уменьшении размера капель до 10 мкм нижний предел воспламенения по объему водорода составил  $7,2 \div 8,5$  % при температуре  $20 \div 70$  °С. Дальнейшее уменьшение размера капель оказалось невозможным из-за особенностей механического способа распыления [1].

Более тонкий распыл воды может быть получен за счет конденсации насыщенного пара при его внезапном расширении, например, в камере высокого давления ударной трубы [4–9]. Анализ работ [10–14] показал, что быстрое (искусственное или аварийное) расширение

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00–03–32236).

паросодержащих газовых систем сопровождается формированием двухфазной смеси газ + микрокапли (туман). Если газовый компонент горючий, то после зажигания волна горения (пламя) распространяется по смеси, в которой облако микрокапель играет роль объемно-поверхностного ингибитора благодаря тепловым потерям на испарение частиц во фронте пламени. При этом имеется возможность варьировать концентрацию капель путем соответствующего изменения начальных условий (паросодержания, температуры и давления смеси в момент начала расширения). В результате открываются новые пути изучения взаимодействия фронта пламени с микрокаплями и определения влияния жидкой фазы на пределы его распространения в несущем горючем газе. Таким образом, переход к методике формирования микрокапель тумана (с размером частиц примерно  $1 \div 2$  мкм) в результате быстрого расширения представляется перспективным для нахождения предельных возможностей взрывоподавления за счет измельчения теплопоглощающих элементов, каковыми выступают частицы жидкости.

Частичная конденсация пара при внезапном расширении системы «горючая газовая смесь + водяной пар» вблизи пределов горения создает предпосылки превращения негорючей системы в горючую. Именно в этой ситуации принципиален ответ на вопрос о роли капель тумана при распространении пламени.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводили в обогреваемой цилиндрической взрывной камере длиной 0,6 м и внутренним диаметром 0,12 м. Схема установки представлена на рис. 1. Для внезапного расширения исследуемой смеси в нижней части камеры установлена разрывная мембрана из алюминиевой или медной фольги.

Взрывную камеру обогревали четырьмя электронагревателями, симметрично расположенными на ее внешней стенке. Суммарная мощность нагревателей 6 кВт, темп нагрева камеры  $\approx 200$  К/ч. Температуру внутри камеры измеряли шестью хромель-алюмелевыми термопарами. Одну из термопар устанавливали на верхнем фланце камеры, остальные — в специальном штоке диаметром 8 мм, как изображено на рис. 1. В верхний фланец камеры вмонтированы поджигающее устройство

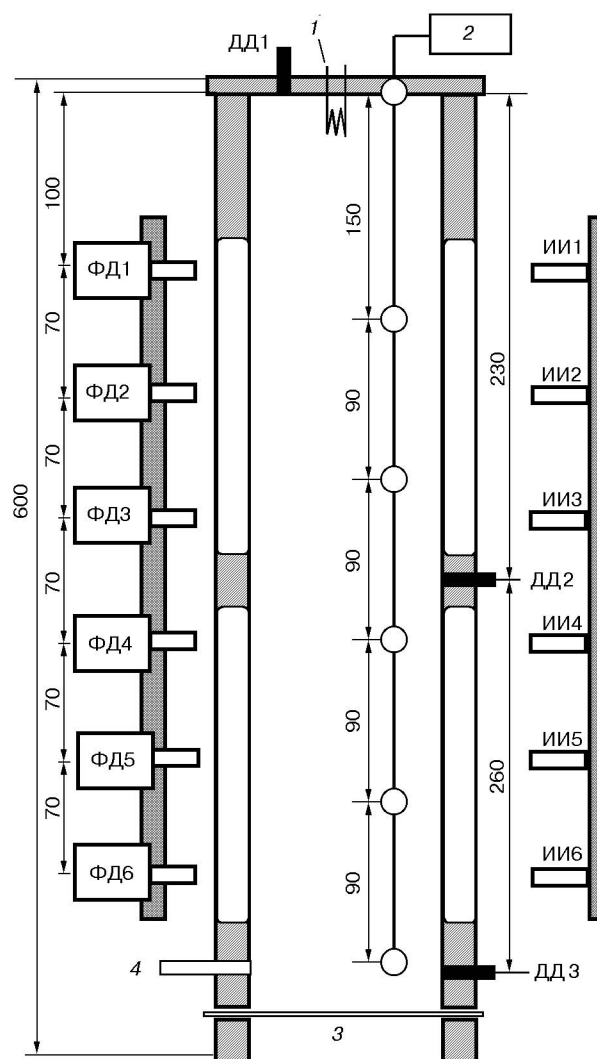


Рис. 1. Схема взрывной камеры:

ФД1–ФД6 — фотодиоды, ИИ1–ИИ6 — инфракрасные излучатели, ДД1–ДД3 — датчики давления, 1 — система поджигания, 2 — термопары, 3 — мембрана, 4 — подача газа

(взрывающаяся проволочка) и датчик давления.

Перед опытом во взрывную камеру вставляли разрывную мембрану и в образовавшийся объем помещали 20 ÷ 40 мл воды. При нагреве камера заполнялась насыщенным паром. После достижения заданного давления пара  $p_{v1}$  (при температуре насыщения  $T_1$ ) в камеру добавляли исследуемую водородовоздушную смесь. Для предотвращения конденсации и обеспечения равномерного перемешивания смесь подавали небольшими порциями через обогреваемую магистраль. При достижении давления  $p_1$ , заданного толщиной мембраны, последняя раз-

рывалась и по камере распространялась волна разрежения. Падение давления (температуры) в проходящей и отраженной от верхнего фланца волн разрежения приводило к конденсации части насыщенного пара. После того как давление в камере уменьшалось до атмосферного (0,1 МПа), камера оказывалась заполненной смесью водород + воздух + пар + микрокапли (туман), готовой к воспламенению. Изменение давления во взрывной камере регистрировали тремя пьезоэлектрическими датчиками (ДД1–ДД3). По истечении установленного на отладочной стадии временного интервала подавали напряжение на взрывающуюся проволочку.

Давление разрыва мембраны варьировали в диапазоне  $p_1 = 0,3 \div 1,5$  МПа. Изучали горение водородовоздушных смесей с объемной концентрацией водорода  $10 \div 30$  %.

Для визуализации формирования микрокапель (тумана) и процесса распространения пламени в камере имелись окна. Система регистрации распространения пламени включала шесть германиевых фотодиодов (ФД1–ФД6). В отличие от стандартной методики измерения положения фронта пламени в трубах с помощью оптоэлектронных полупроводниковых сенсоров каждый фотодиод работал в сочетании с расположенным напротив инфракрасным излучателем (ИИ1–ИИ6). Излучателями были светодиоды с рабочей длиной волны 0,96 мкм. Измерения давали информацию о формировании тумана и динамике взаимодействия пламени со взвешенными микрокаплями при известной зависимости интенсивности прошедшего через камеру излучения от концентрации и размера частиц.

Пламя является источником ИК-излучения на рабочей длине волны светодиодов. Для разделения сигналов излучения пламени и светодиодов сигнал светодиодов модулировался генератором ступенчатых импульсов Г5-54. Выбранный период модуляции ( $50 \div 100$  мкс) значительно ниже характерных времен пробега по камере исследуемых пламен (видимые скорости пламени  $5 \div 20$  м/с). Сигналы фотодиодов и датчиков давления записывали встроенным в персональный компьютер многоканальным АЦП Т512.

В опытах реализован метод измерения параметров взвешенного облака микрокапель по поглощению ИК-излучения на двух длинах волн с помощью двухполосного фотодиода. По показаниям такого фотодиода вычисляли раз-

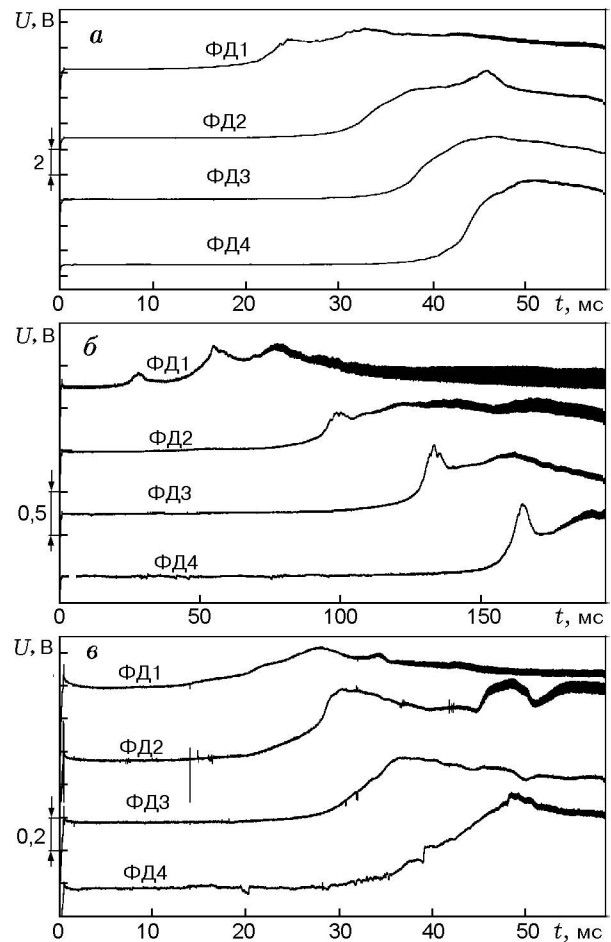


Рис. 2. Записи сигналов излучения при распространении пламени:

а — 30 %  $H_2$  + воздух,  $p_1 = 0,75$  МПа,  $p_{v1}/p_1 = 0,23$ ;  
б — 18 %  $H_2$  + воздух,  $p_1 = 0,79$  МПа,  $p_{v1}/p_1 = 0,2$ ;  
в — 10 %  $H_2$  + воздух,  $p_1 = 0,9$  МПа,  $p_{v1}/p_1 = 0,056$

мер микрокапель и их объемную концентрацию. Пример применения метода поглощения видимого и ближнего инфракрасного излучения к процессам горения представлен в [15], где измеряли размеры и концентрацию частиц сажи в продуктах сгорания керосина. В [16] описано применение двухполосного ФД в качестве чувствительного элемента пирометра спектрального отношения. Время отклика такого ФД на ступенчатый световой импульс (при минимальном коэффициенте усиления) не более 1 мкс. В качестве монохроматических излучателей использовали ИК-светодиод (длина волны  $\lambda = 0,96$  мкм) и полупроводниковый лазер ( $\lambda = 1,56$  мкм). Параметры тумана измеряли на расстоянии 115 мм от верхнего днища камеры по схеме, описанной в [17].