

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАСШИРЕНИЯ БЕДНОГО ПРЕДЕЛА ГОРЕНИЯ
МЕТАНА С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ
ПРОГРЕВА ПЛАМЕНИ

**П. А. Гусев, С. М. Фролов, О. Г. Скрипник,
А. С. Штейнберг, А. А. Берлин**

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Принцип сжигания топлива в условиях «избыточной энтальпии», а также некоторые конструкции практических горелок с внешними теплообменниками были впервые предложены еще в начале 1970-х гг. Сжигание реакционноспособной газовой смеси в твердом пористом каркасе (матрице) — один из ярких примеров возможности управления горением с помощью «внутреннего» теплообменника. Вследствие высокой теплопроводности каркаса зона прогрева газового пламени формируется под воздействием дополнительного подвода тепла по этому каркасу. Такое тепловое воздействие на зону прогрева газового пламени приводит к увеличению скорости горения и расширению концентрационных пределов горения. Как следствие, применение пористой матрицы позволяет сжигать многие практически интересные смеси, которые в обычных условиях не горят, в частности смеси, сильно обедненные горючим. Кроме теплового воздействия на предпламенную зону предлагают использовать и химическое воздействие путем нанесения каталитического слоя на внутреннюю поверхность пор.

В [1–3] для существенного расширения бедного концентрационного предела горения по сравнению с указанными известными методами предложено использовать дополнительное (внешнее) тепловое воздействие на газ и пористый каркас в зоне прогрева стационарного пламени. Подчеркнем, что дополнительное тепловое воздей-

ствии предлагается осуществлять именно в зоне прогрева пламени, чтобы максимально использовать тепло, поступающее по каркасу из продуктов горения. В этом случае для небольшого локального повышения температуры до уровня, при котором начинаются активные предпламенные реакции, потребуется минимальная мощность внешнего теплового источника. Цели данной работы — экспериментальная проверка идеи [3] и исследование особенностей горения с дополнительным теплоподводом в предпламенной зоне.

Экспериментальные исследования проводили на измерительном стенде с вертикальным проточным реактором поперечного сечения 50×50 мм (рис. 1). Три боковые стенки реактора выполнены из огнеупорного кирпича 1, а четвертая — из огнеупорного стекла 2 для визуального наблюдения за процессом горения. Горючий газ 3 (метан) и воздух 4 подавались в реактор отдельно и, пройдя через смеситель 5, поступали в камеру сгорания. Чтобы стабилизировать пламя в камере сгорания, на высоте 75 мм от выходного сечения смесителя размещали пористую керамическую пластину 6 толщиной 12 мм с регулярными прямыми трубчатыми каналами диаметром 1 мм. Зажигающее устройство (высоковольтный искровой разрядник 7) помещали непосредственно над керамической пластиной в центре сечения реактора. Свободное пространство камеры сгорания заполняли гранулированным диэлектрическим огнеупорным материалом насыпной плотности, причем размер гранул в пространстве между смесителем и керамической пластиной составил 10–25 мм (8), а над керамической пластиной — 5–8 мм (9). Для дополнительного теплового воздействия на процесс горения в пространстве между смесителем и керамической пластиной размещали миниатюрные электронагреватели H_1 , H_2 и H_3 , выполненные в виде плоской сетки из нихромовой проволоки, перекрывающей все сечение реактора. Электронагреватель H_1 размещался непосредственно под керамической пластиной, а электронагреватели H_2 и H_3 — на 21 и 42 мм ниже керамической пластины соответственно. Для диагностики процесса горения вдоль реактора устанавливали термодатчики T_1 , T_2 , T_3 и T_4 , причем термодатчик T_1 находилась на 17 мм выше керамической пластины, а термодатчик T_2 — на 5 мм ниже пластины. Кроме того, реактор оборудован газоотборными трубками 10 для хроматографического анализа состава газовой смеси, включая окислы азота.

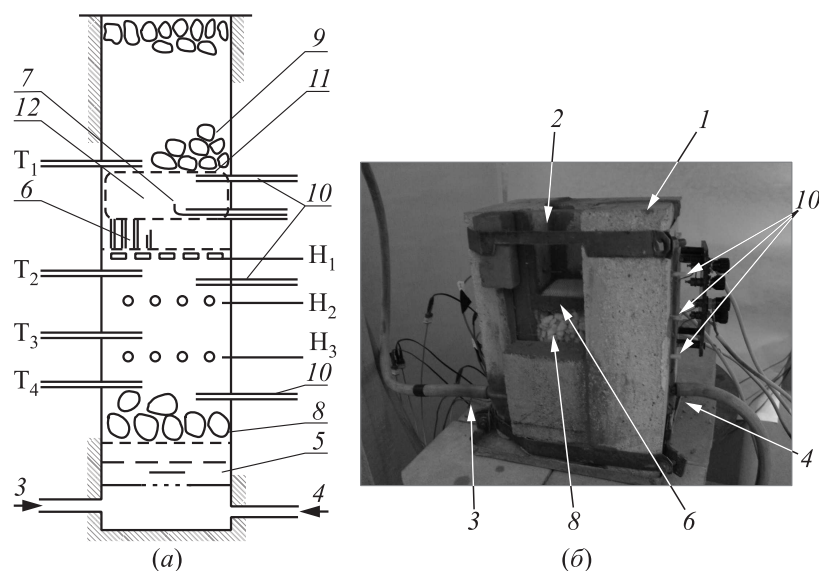


Рис. 1 Схема (а) и фотография (б) реактора: 1 — огнеупорный кирпич, 2 — огнеупорное стекло, 3 — горючий газ (метан), 4 — воздух, 5 — смеситель, 6 — пористая керамическая пластина, 7 — искровой разрядник, 8 — гранулированный наполнитель (фракции 10–25 мм), 9 — гранулированный наполнитель (фракции 5–8 мм), 10 — газоотборные трубки, 11 — металлическая сетка, 12 — полость

Исследовали стационарное горение бедных метано-воздушных смесей при нормальном атмосферном давлении. Провели три серии опытов: (1) при выключенных электронагревателях; (2) при включенном электронагревателе H_1 и (3) при включенных электронагревателях H_2 и H_3 . В опытах серии (1) выяснилось, что при содержании метана менее $5,4 \pm 0,1\%$ (об.) стационарное горение в реакторе невозможно. Включение электронагревателей приводило к расширению бедного предела, хотя горение было не очень устойчивым: оно сопровождалось хаотическими колебаниями фронта пламени. В опытах серий (2) и (3) выяснилось, что включение электронагревателя H_1 способствовало большему расширению бедного предела, чем включение электронагревателей H_2 и H_3 при той же

суммарной мощности. Этот вывод косвенно следовал из анализа показаний термопар, так как в серии опытов (2) температура, регистрируемая термопарой T_1 , была всегда выше, чем в серии опытов (3). Подчеркнем, что в предварительных опытах серий (2) и (3) с продувкой реактора воздухом показания термопары T_1 практически не зависели от положения электронагревателей и определялись расходом воздуха и мощностью теплоподвода.

Чтобы повысить устойчивость горения, над керамической пластиной с помощью металлической сетки 11 сделали полость 12 высотой 15 мм (см. рис. 1). Такая полость оказала значительное стабилизирующее влияние на горение бедных метано-воздушных смесей. В реакторе с полостью повторили те же три серии опытов, что и в реакторе без полости. В проведенных опытах прямо доказано, что включение электронагревателя H_1 приводит к большему расширению бедного предела, чем включение электронагревателей H_2 и H_3 при одинаковой суммарной мощности. Например, при мощности электронагревателя H_1 , равной 20 ± 1 Вт, в реакторе достигнуто устойчивое горение смеси с содержанием метана $4,3 \pm 0,1$ % (об.). Такой дополнительный теплоподвод соответствовал приблизительно 16% мощности реактора. При той же суммарной мощности электронагревателей H_2 и H_3 стационарного горения указанной смеси не наблюдали. На рис. 2 показано сравнение результатов измерений температур термопарами T_1 и T_2 в двух опытах серий (2) и (3) для смеси с содержанием метана $5,4 \pm 0,1$ % (об.). Видно, что в первом случае (рис. 2, а) перепад температур на термопарах T_1 и T_2 больше, чем во втором (рис. 2, б). При этом температура, измеренная термопарой T_2 , в первом случае ниже, чем во втором, а температура, измеренная термопарой T_1 , — выше. Относительно низкие температуры продуктов горения связаны, по-видимому, с неполным сгоранием смеси: в продуктах горения при хроматографическом анализе обнаруживали метан.

Таким образом, в работе экспериментально доказано, что дополнительное (внешнее) тепловое воздействие на газ и пористый каркас в зоне прогрева стационарного пламени приводит к расширению бедного предела горения метана даже при относительно малой мощности теплоподвода. Расположение внешнего теплового источника в зоне прогрева пламени более эффективно, чем вверх по потоку за пределами зоны прогрева. Этот эффект связан, по-видимому, с

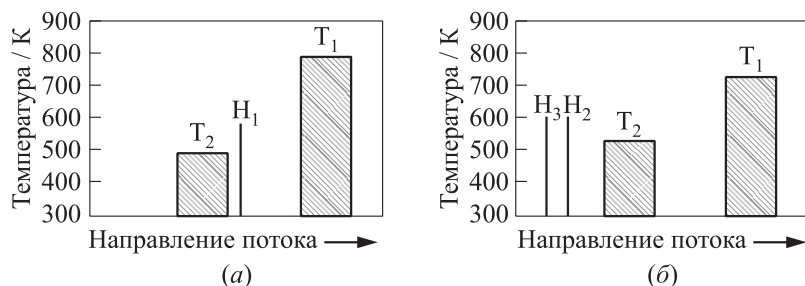


Рис. 2 Сравнение результатов измерений температур термopарами T_1 и T_2 в двух опытах с включенными электронагревателем H_1 (а) и электронагревателями H_2 и H_3 (б) для смеси с содержанием метана $5,4 \pm \pm 0,1$ % (об.) при мощности внешнего энергоподвода 20 Вт

активным протеканием предпламенных реакций в окрестности горячей поверхности нагревателя, помещенного в зону прогрева. Для понимания фундаментальных особенностей горения с дополнительным теплоподводом в предпламенной зоне необходимы дальнейшие исследования. Успех на этом пути позволит создать принципиально новые конструкции горелок с ультранизким выходом окислов азота для многочисленных практических приложений.

Авторы признательны В. Я. Басевичу за ценное обсуждение работы.

Литература

1. Ушаковский О. В., Штейнберг А. С., Худяев С. И. // *Химическая физика*, 1988. Т. 7. № 10. С. 1400–1410.
2. Shteinberg, A. S., and V. A. Knyazik. 1995. Electrocombustion. In: *Combustion, detonation, shock waves*. Eds. A. G. Merzhanov, and S. M. Frolov. 1:358–72.
3. Берлин А. А., Штейнберг А. С., Фролов С. М., Беляев А. А., Посвянский В. С., Басевич В. Я. Расширение пределов горения в пористой горелке с помощью внешнего подогрева // *Доклады академии наук*, 2006. Т. 406. № 6. С. 770–775.