

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В СОСТАВНЫХ ПОРИСТЫХ НАСАДКАХ

В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, В. В. Шумский

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
baev@nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования горения пропан-бутана и метана с воздухом на насадках, составленных из пористого материала с размером пор ≈ 0.35 мм и из ячеисто-пористого материала с размером пор ≈ 3 мм при расположении зоны горения на стыке материалов. Сравнение состава продуктов и полноты сгорания с результатами расчетов равновесных составов, выполненных в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $\alpha = 0.4 \div 2.5$ показало существенное отклонение опытных данных от равновесных значений (меньшее содержание H_2 и NO , большее значение соотношения CO/CO_2 , повышенная полнота сгорания при $\alpha = 0.6 \div 0.7$ и пониженная в районе стехиометрии), связанное с интенсивным отводом тепла излучением и радиационной закалкой состава продуктов.

Ключевые слова: пористые насадки, пропан-бутан, метан, полнота сгорания, радиационный отвод тепла.

ВВЕДЕНИЕ

Микроканальные и пористые насадки для сжигания газообразного топлива получили достаточно широкое распространение в качестве инфракрасных излучателей в бытовых приборах и некоторых промышленных технологиях. Это стимулировало поиск новых высокотемпературных и стойких к окислению пористых материалов, исследование физических аспектов горения, включая спектральные и другие характеристики подобного рода излучателей [1, 2].

С точки зрения эксплуатационных свойств немаловажны такие характеристики, как завершенность процесса энерговыделения (химическая полнота сгорания), образование вредных веществ, тепловая инерционность, устойчивость к пробою пламени в смеситель, влияние качества предварительного смешения.

Настоящее исследование проведено с целью получения экспериментальных данных, которые позволили бы оценить отмеченные выше параметры, на примере пористой насадки, изготовленной методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в Отделе структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Она представляет собой имитатор теплосилового устройства (ТСУ), работающей под разрежением. Атмосферный воздух подается вентилятором в камеру сгорания, изготовленную из кварцевой трубы с внутренним диаметром 52 мм и длиной ≈ 250 мм.

Внутри кварцевой трубы расположено газогорелочное устройство струйно-стабилизаторного типа, которое использовалось в данных экспериментах как смесительное устройство. Параметры устройства выбраны на основании рекомендаций справочной литературы [3].

Ниже по потоку установлена пористая пластина из никель-алюминиевого интерметаллида, изготовленная методом СВС. Пористость пластины ≈ 65 %, характерный размер пор ≈ 0.35 мм, толщина пластины ≈ 8 мм. За ней находится пластина из ячеисто-пористого никеля толщиной ≈ 15 мм, ее пористость 95 %, характерный размер пор $2 \div 3$ мм. За камерой расположен тепловой аккумулятор — засыпка дробленого металлургического шлака в трубу, наружная стенка которой охлаждается водой.

Значительная часть тепла отводится из камеры сгорания излучением (и частично конвекцией) через кварцевые стенки, что имитирует работу, например, котла ТСУ, а охлаждение в тепловом аккумуляторе имитирует теплоотдачу в конвективных поверхностях нагрева ТСУ.

Расход воздуха измеряли по разрежению на входе в камеру сгорания с помощью из-

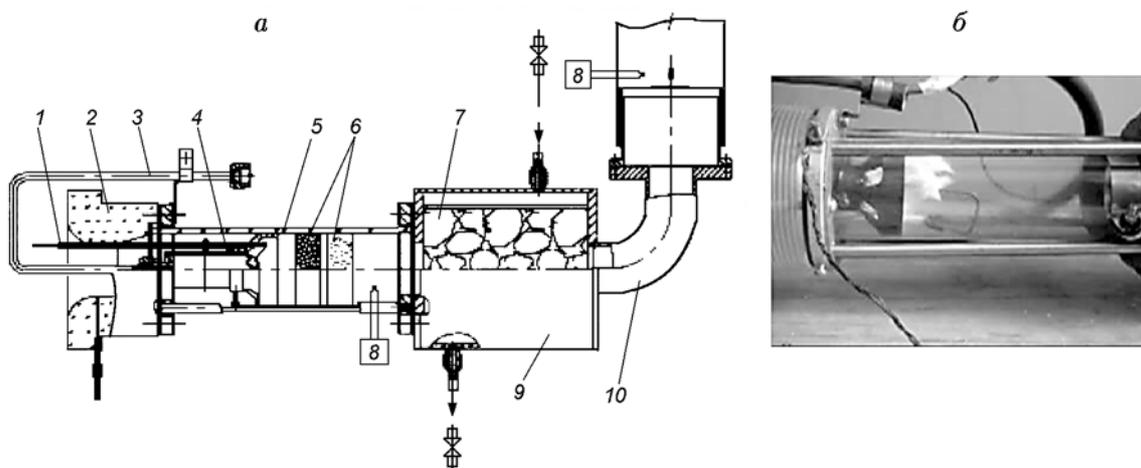


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и вид работающего горелочного устройства (смесителя) (б):

1 — поджигающее устройство, 2 — входное сопло, 3 — газопровод, 4 — горелка, 5 — кварцевая труба, 6 — насадка, 7 — наполнитель, 8 — термопара, 9 — тепловой аккумулятор, 10 — выхлоп

мерителя давления ADP 0.25.2 с точностью ± 1 Па. Расход газа определяли путем непрерывного взвешивания баллона с газом. Постоянство расхода контролировалось по перепаду давления в газовом тракте, измеряемому U-образным манометром.

В ходе эксперимента проводился непрерывный газовый анализ с помощью газоанализатора «Тест» с компьютерной посекундной регистрацией концентраций O_2 , CO , CO_2 , H_2 , CH , NO . Измерялась также температура в точке отбора.

ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Термохимические расчеты выполнены по программе «Тегга» для метановоздушных и пропанобутан-воздушных смесей при атмосферном давлении в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $\alpha = 0.4 \div 2.5$, температур $T = 600 \div 4000$ К. Результаты расчетов использовались для сопоставления результатов газового анализа с термодинамически равновесными составами.

Коэффициент избытка воздуха и химическую полноту сгорания (энерговыведения) рассчитывали по измеренному составу продуктов сгорания.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Горелочное устройство струйно-стабилизационного типа, использованное в данном исследовании в качестве смесителя, позволяет

сжигать газовое топливо в широком диапазоне составов за счет изменения дальности струй, распространяющихся вдоль рециркуляционных зон за стабилизаторами пламени, и характеризуется достаточно равномерным полем температур и составов благодаря общей зоне рециркуляции, образующейся вследствие его конической формы. Геометрические параметры использованной конструкции выбраны таким образом, чтобы струи достигали стенки камеры при $\alpha \approx 2 \div 5$. Это позволяет запускать камеру при среднем значении $\alpha \approx 10$, а при $\alpha < 2$ ориентироваться на завершение процессов смешения и горения в объеме общей рециркуляционной зоны. При организации горения на пористых насадках это должно обеспечить (при необходимости) предварительный разогрев насадки до умеренных температур, а в случае проскока пламени через пористую насадку — локализовать зону горения.

Однородность состава по сечению была проверена путем измерений у верхней и нижней образующих стенки и на оси потока. Возле верхней образующей температура была выше на ≈ 100 °С, что, по-видимому, объясняется естественной конвекцией. Это дало основания проводить измерения на оси камеры в ее конце, перед входом в тепловой аккумулятор.

Представительность проб была проверена измерением состава за тепловым аккумулятором. Установлено, что за счет присосов по тракту коэффициент α увеличивался, но отношения концентраций CO/CO_2 , H_2/CO остава-

лись теми же, что и в камере. Это свидетельствовало о замороженности анализируемого состава и соответственно о представительности проб, отбираемых в конце камеры сгорания.

Визуальные наблюдения показали, что при использовании составной конструкции при близком расположении ячеисто-пористой никелевой пластины и мелкопористой насадки (0 ÷ 5 мм) между ними устанавливается первоначальный фронт горения и через небольшой промежуток времени пламя заходит во внешние слои пористого материала. Затем следует значительный по времени прогрев насадки (минуты), после чего устанавливается стационарный режим. При некоторых режимах наблюдался проскок пламени в смеситель, где пламя стабилизировалось и насадка разогрелась целиком.

При увеличении расстояния между пластинами до 12 ÷ 18 мм пламя стабилизировалось на ячеисто-пористой насадке с ухудшением полноты сгорания.

В отлаженной системе наблюдалась хорошая повторяемость результатов по всем измеряемым параметрам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При сжигании CH_4 и смеси C_3H_8 — C_4H_{10} (50/50) расходы изменялись в диапазоне 15 ÷ 150 мг/с, коэффициент избытка воздуха — в интервале 0.65 ÷ 2.5, что соответствует теплонапряженности сечения $\approx 30 \div 300 \text{ Вт/см}^2$. Диапазон скоростей холодного потока в сечении перед пористой насадкой составлял 0.1 ÷ 1 м/с.

В таблице приведены диапазоны параметров и соответствующие обозначения экспериментальных точек на рисунках.

Изменение полноты тепловыделения η , вычисленной по результатам газового анализа, в зависимости от α приведено на рис. 2 в сравнении с результатами термохимических расчетов для замороженного состава при адиабатической температуре. Наибольшие расхождения наблюдаются в районе стехиометрии, здесь реальное тепловыделение ниже равновесного. В то же время при $\alpha = 0.6 \div 0.7$ реальное тепловыделение несколько выше расчетного, а при $\alpha > 1.4$ практически всегда $\eta \approx 1$.

Детальное рассмотрение состава продуктов сгорания показывает, что отличие от равновесного проявляется в повышенном содержании CO и малом содержании H_2 , что особенно

Вид топлива	Расход топлива, мг/с	Коэффициент избытка воздуха α	Вид на рисунках
Пропан-бутан	17	0.89 ÷ 2.0	×
	30 ÷ 39	0.82 ÷ 2.09	●
	57	0.97 ÷ 0.90	+
	77 ÷ 100	0.615 ÷ 2.18	○
	120 ÷ 146	0.68 ÷ 0.7	*
Метан	15	1.032	■
	26	0.79 ÷ 0.911	□
	33 ÷ 36	0.84 ÷ 1.08	▲
	43 ÷ 45	0.8 ÷ 2.45	△

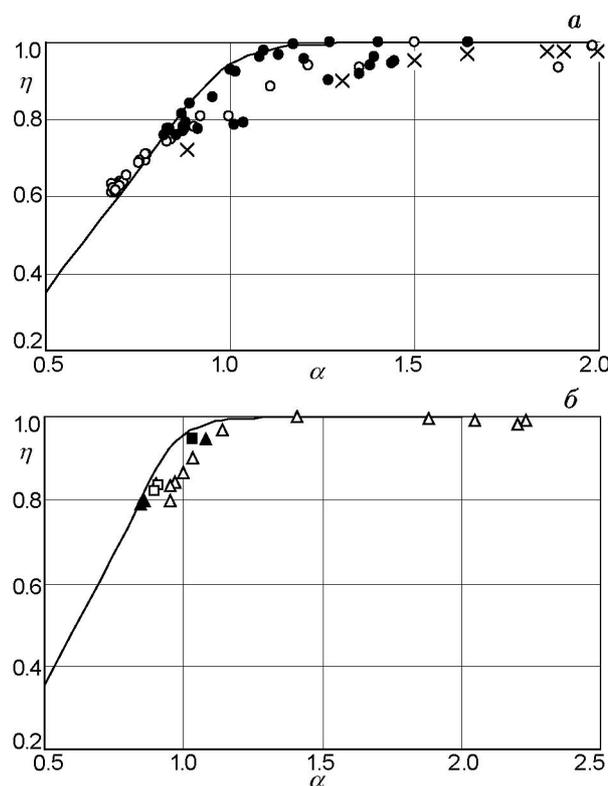


Рис. 2. Сравнение равновесной и измеренной полноты сгорания пропан-бутана (а) и метана (б):

точки — эксперимент, линии — термохимический расчет

заметно при $\alpha < 1$. Показательно, что во всех опытах содержание H_2 не превышало 3 %.

Характер отклонений от равновесного состава иллюстрируют рис. 3, 4. Сплошными линиями представлены результаты термохимиче-

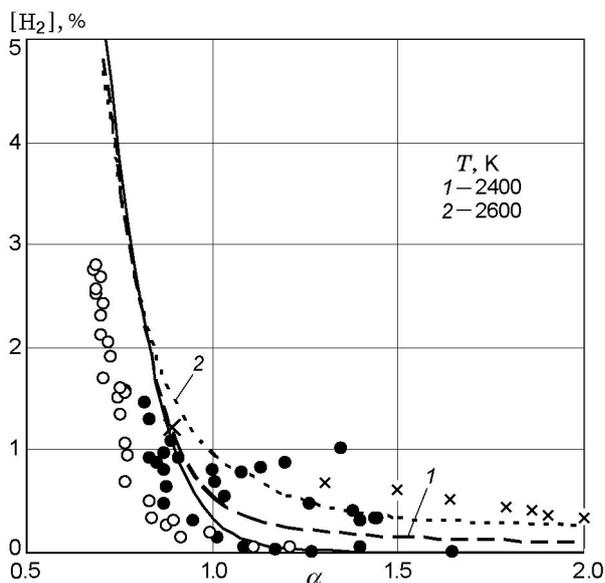


Рис. 3. Содержание водорода в продуктах сгорания пропан-бутана

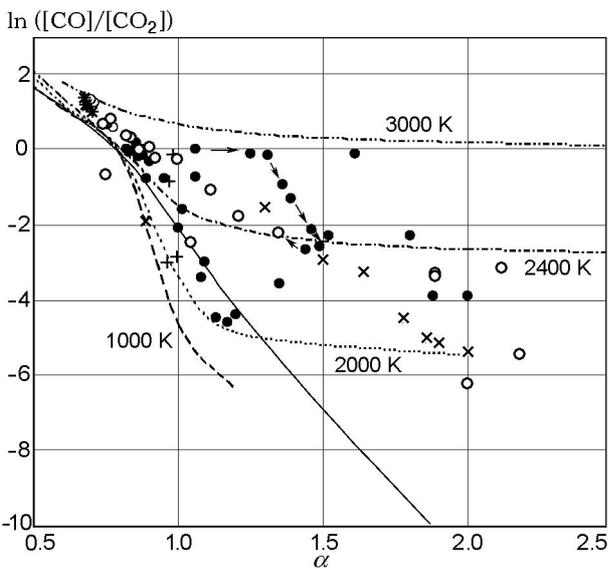


Рис. 4. Влияние избытка воздуха на отношение концентраций CO и CO₂

ских расчетов при адиабатической температуре горения T_{ad} , остальные линии — при различных значениях T , линия со стрелками соответствует одному из характерных режимов во времени, иллюстрирующему влияние прогрева пористой насадки (см. также ниже рис. 8).

По-видимому, процесс горения в пористой теплопроводящей насадке происходит стадийно, с преимущественным расходом водорода в начальной стадии и замораживанием со-

става при температуре, отличной от адиабатической и, как правило, более высокой, с последующим охлаждением за счет интенсивного отвода тепла излучением (радиационное закачивание). С практической точки зрения это обстоятельство является важным, поскольку для снижения концентрации CO в продуктах сгорания требуется либо дополнительное количество кислорода (воздуха), либо использование каталитического дожигателя. С другой стороны, появляется возможность изменять отношение H_2/CO в продуктах газификации, что открывает путь к регулированию процессов, например, синтеза жидких углеводородов.

Относительные потери энтальпии \bar{Q} продуктов сгорания вследствие излучения и конвекции от стенок камеры сгорания приведены на рис. 5, 6, где \bar{Q} определено как

$$\bar{Q} = 1 - \frac{(I_{pr} - I_0)\eta_0}{(I_{ad} - I_0)\eta}$$

Здесь I_{ad} — расчетная энтальпия продуктов сгорания для адиабатического горения, I_{pr} — энтальпия продуктов сгорания при измеренной температуре, I_0 — энтальпия исходной горючей смеси, η — реальная полнота тепловыделения, η_0 — расчетная полнота тепловыделения.

Высокие значения \bar{Q} объясняются, в частности, излучением разогретой насадки с обеих сторон.

Приведенные на рис. 5, 6 данные свидетельствуют, что из камеры сгорания с прозрачными стенками значительная часть выделяющегося тепла отводится в виде «чистой» теп-

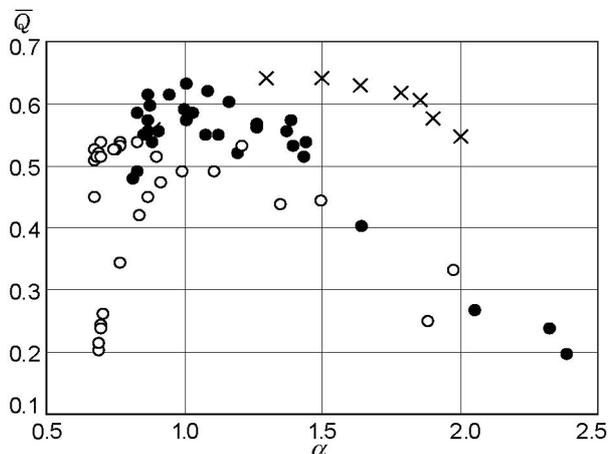


Рис. 5. Относительные потери энтальпии при горении пропан-бутана

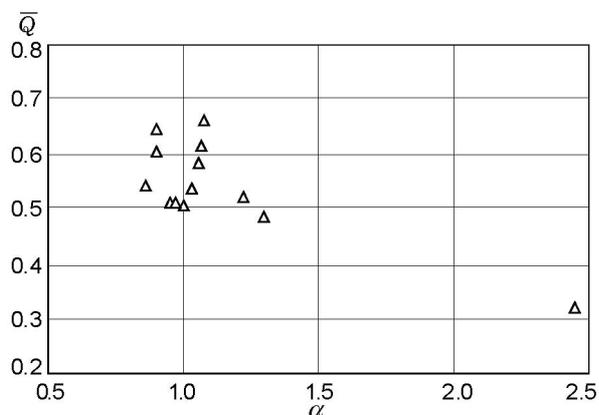


Рис. 6. Относительные потери энтальпии при горении метана

ловой энергии в теплосиловой установке на высоком температурном уровне.

Данные по образованию оксида азота представлены на рис. 7. Видно, что при относительно высоких расходах топлива измеренные концентрации NO хорошо соответствуют термодинамически равновесным значениям при $T < T_{ad}$. При низких расходах топлива измеренные концентрации NO существенно ниже, что свидетельствует о влиянии времени пребывания в зоне горения до момента радиационного замораживания, прекращающего рост концентрации NO.

Влияние термического состояния пористой насадки на состав продуктов сгорания иллюстрирует рис. 8, где приведены рассчитанные по результатам газового анализа измене-

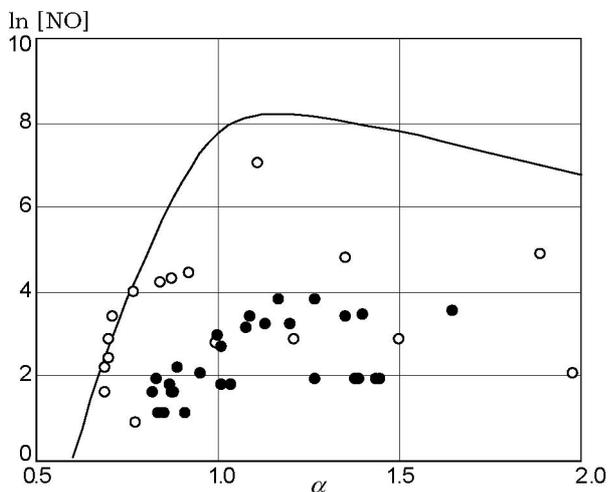


Рис. 7. Концентрация оксида азота в продуктах сгорания

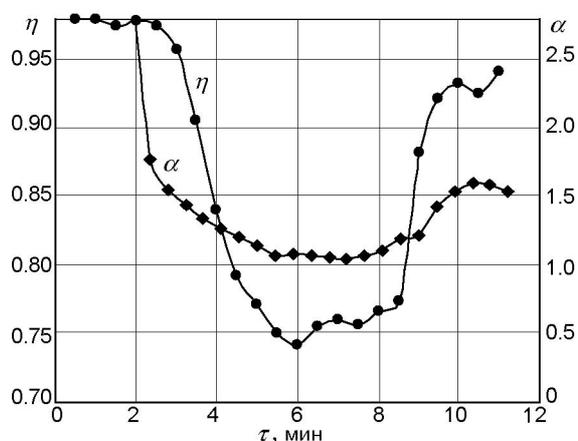


Рис. 8. Влияние термического состояния пористой насадки на процесс горения

ния полноты сгорания η и коэффициента избытка воздуха α во времени. На холодной насадке при $\alpha > 1$ происходит почти полное сгорание. По мере прогрева за счет изменения сопротивления тракта при постоянном расходе топлива устанавливается практически стационарный режим (≈ 5 мин). Уменьшение расхода топлива приводит к новому режиму горения с восстановлением α , но с $\eta < 1$ (за счет увеличения концентрации CO). Если концентрация превышает допустимый предел загрязнений, то может потребоваться каталитическое дожигание, но уже при температурах, существенно более низких, чем максимальная температура сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано горение газообразных топлив на установке, в которой предусмотрены важные с эксплуатационной точки зрения мероприятия: близко расположенный к пористой насадке смеситель, способный работать при проскоке пламени через насадку; крупноячеистая светопроницаемая дополнительная насадка (составная конструкция), необходимая для быстрого разогрева; прозрачные стенки камеры сгорания, позволяющие осуществлять максимальный отвод тепла радиацией.

Подтверждена эффективность такой установки.

Вместе с тем, результаты детального непрерывного анализа газов демонстрируют сложность процессов, происходящих при горении в этих условиях. В частности, большой ра-

диационный отвод энергии способствует замораживанию состава продуктов сгорания, образующихся при высоких температурах, что может приводить к снижению полноты сгорания либо к повышению содержания СО; в то же время концентрация оксида азота не достигает равновесных значений, по-видимому, из-за малого времени пребывания газов в зоне максимальных температур.

Окисление как пропан-бутана, так и метана проходит стадийно, что определяет низкое содержание водорода в продуктах газификации ($\alpha < 1$).

Выполненное исследование демонстрирует актуальность детального исследования процессов распространения пламен в проницаемых средах с учетом неравновесности термохимических преобразований углеводородов и радиационного теплообмена внутри проницаемой среды и отвода энергии во внешнее пространство.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирдяшкин А. И., Орловский В. М., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Гуцин А. Н., Панарин В. А.** Энергетические и спектральные характеристики излучения в процессе фильтрационного горения природного газа // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 37–41.
2. **Баев В. К., Бажайкин А. Н.** Применение проницаемых материалов при организации горения твердых топлив // Горение твердых топлив: VII Всеросс. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 10–13 ноября 2009 г.: сб. докл. — Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2009. — Ч. 4.1. — С. 159–168.
3. **Рациональное** использование газа в энергетических установках: справочное руководство / Р. Б. Ахмедов, О. Н. Брюханов, А. С. Иссерлин и др. — Л.: Недра, 1990.

Поступила в редакцию 14/X 2010 г.