

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

А. П. Баскаков, В. А. Мунц, А. А. Ашихмин

(Свердловск)

Развитие техники низкотемпературного сжигания углей в псевдоожигенном слое невозможно без детального изучения процесса горения в столь специфических условиях. Имеющиеся литературные данные [1—3] противоречивы даже в оценке того, что определяет скорость выгорания: кинетика реакции [3] или диффузия реагентов через газовый пограничный слой [1, 2].

Исследования проводились на установке, позволяющей фиксировать изменение массы выгорающей навески угля во времени. Псевдоожигенный воздухом слой мелкодисперсного материала (корунд фракций 120 или 460 мкм) создавался в реторте внутренним диаметром 40 мм, размещенной в электропечи. Внутри реторты был установлен полый цилиндр диаметром 38 мм с приваренной к нему (на расстоянии 50 мм от нижнего среза) перфорированной решеткой.

Цилиндр своей нижней частью накрывал газораспределительный колпак, поэтому материал псевдоожигался только внутри цилиндра, а не в кольцевом зазоре между цилиндром и ретортой. Диаметр отверстий перфорированной решетки цилиндра составлял 3 мм, что обеспечивало свободное просыпание инертного материала через нее, но предотвращало провал более крупных частиц угля. В экспериментах использовался уголь (диаметр частиц 5—5,5 мм) Ирша-Бородинского месторождения следующего элементарного состава: $C^p = 43,7\%$, $H^p = 3,0\%$, $S^p = 0,2\%$, $O^p = 13,5\%$, $N^p = 0,6\%$.

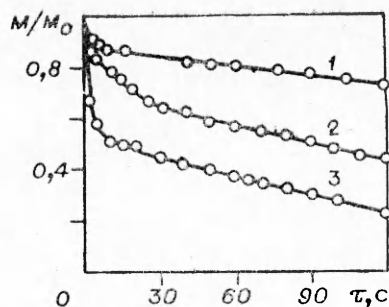
При достижении в установке заданной температуры в цилиндр вводилась навеска топлива, которая выгорала в течение заданного промежутка времени. Затем цилиндр извлекался из реторты и помещался в псевдоожигенный слой холодного инертного материала, оживаемого двуокисью углерода. Это обеспечивало надежное и быстрое потухание и охлаждение выгорающей навески угля. Начальная масса навески в основной серии экспериментов составляла 0,5 г, благодаря чему концентрация кислорода при горении угля практически не изменялась и составляла на выходе из установки $\sim 20\%$. Сравнивая массу навески угля после охлаждения с начальной массой при различной длительности ее выгорания, строили кривые выгорания (рис. 1). Интенсивное изменение массы навески в начальный момент времени обусловлено выходом летучих, доходящих у Ирша-Бородинского угля до 40%. При этом рост температуры слоя существенно увеличивает как количество, так и скорость выхода летучих веществ.

Постоянство угла наклона кривых после выхода летучих свидетельствует о постоянстве скорости выгорания коксового остатка. Это подтверждается также данными газового анализа, которые показали, что через 20—30 с горения навески концентрации кислорода и двуокиси углерода устанавливаются на постоянном уровне. Эффективная константа скорости горения коксового остатка k_s , мг/(см²·с), определялась из экспериментальных данных по следующей формуле:

$$k_s = \Delta M / n \Delta t S,$$

где ΔM — изменение массы за промежуток времени Δt ; n — количество частиц навески; S — геометрическая площадь поверхности одной частицы, рассчитанная по начальному ее размеру в предположении, что она имеет сферическую форму.

Рис. 1. Изменение массы навески угля во времени при $T = 350$ (1), 500 (2) и 900°C (3).



Из данных, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что горение частиц угля диаметром 5 мм в псевдооживленном слое мелкозернистого материала в диапазоне температур $500\text{—}900^\circ\text{C}$ определяется диффузией реагирующих компонентов через пограничный слой, поскольку скорость горения практически не зависит от температуры, но растет с увеличением скорости воздуха w . С ростом диаметра частиц инертного материала $d_{\text{и}}$ меньшая часть газа проходит через слой в виде пузырей. Это увеличивает скорость омывания газом частиц сплошной фазы слоя и, соответственно, приводит к интенсификации выгорания.

При температуре слоя меньше 500°C на суммарную скорость горения, по-видимому, начинает оказывать влияние скорость химического взаимодействия угля с кислородом. Оценка константы скорости химической реакции дала значение энергии активации в диапазоне температур $300\text{—}500^\circ\text{C}$, примерно равное 96 кДж/моль , что достаточно хорошо совпадает с известными данными [4].

Эффективная константа скорости горения (рис. 3) возрастает пропорционально скорости псевдооживления в степени $0,3$. Это позволяет провести аналогию между массообменом и конвективным теплообменом в псевдооживленном слое, для которого в работе [5] установлено возрастание коэффициента теплоотдачи с увеличением скорости в той же степени вплоть до значения оптимальных скоростей.

При выгорании частицы угля уменьшаются ее размеры. Так, при температуре слоя 900°C за 90 с радиус частицы уменьшился примерно в $1,5$ раза, а поверхность соответственно более чем в 2 раза, и тем не менее скорость выгорания частицы осталась неизменной (см. рис. 1). Этот факт можно объяснить, полагая, что с уменьшением диаметра частицы коэффициент массоотдачи к ней возрастает обратно пропорционально его квадрату, т. е. диффузионный критерий Нуссельта обратно пропорционален размеру частицы. Такое предположение не укладывается в рамки современных представлений о массопереносе в псевдооживленном слое, поэтому закономерности горения натуральных углей (а не предварительно приготовленных из них коксов) в кипящем слое требуют дальнейших углубленных исследований.

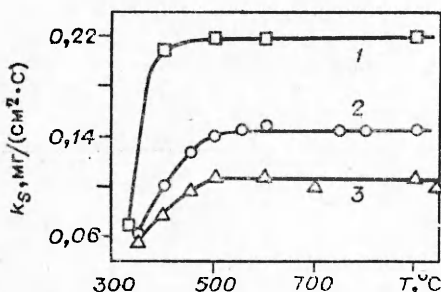


Рис. 2. Зависимость эффективной константы скорости горения угля от температуры. 1 — $d_{\text{и}} = 0,45\text{ мм}$, $w = 0,24\text{ м/с}$; 2 — $d_{\text{и}} = 0,12\text{ мм}$, $w = 0,3\text{ м/с}$; 3 — $d_{\text{и}} = 0,12\text{ мм}$, $w = 0,1\text{ м/с}$.

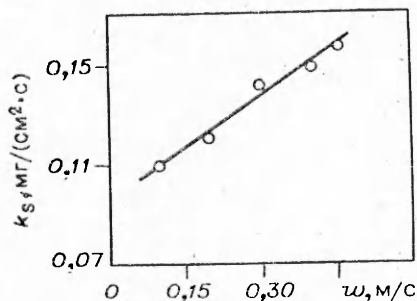


Рис. 3. Зависимость эффективной константы скорости горения угля от скорости воздуха в слое корунда $0,12\text{ мм}$; $T = 900^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бородуля, Л. М. Виноградов, Д. М. Галерштейн и др. — В кн.: Проблемы технологического горения. Т. II. Черноголовка, 1981.
2. R. K. Chakraborty, J. R. Howard. J. Inst. Fuel, 1978, 51, 403.

3. E. K. Campbell, J. F. Davidson. Fluids. Combust. Int. Conf. London, 1975, A2/1 — A2/3.
4. Т. В. Виленский, Д. М. Хзмалян. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1978.
5. А. П. Баскаков, В. М. Супрун. Химическое и нефтяное машиностроение, 1971, 3.

УДК 662.581 : 536.46

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ СОСТАВНЫХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

В. Н. Симоненко, В. Е. Зарко, А. Б. Кискин, В. Д. Гладун,
Л. Я. Кашипов, Н. А. Силин

(Новосибирск)

Вопросы изучения горения составных образцов впервые, вероятно, были поставлены в работе К. К. Андреева [1]. В этой и последующих публикациях [2, 3] изучалось горение гомогенных порохов. Известны также результаты исследования нестационарного горения безгазовых систем [4]. Настоящая работа посвящена экспериментальному определению устойчивости переходных процессов при горении составных гетерогенных образцов: двойных смесей типа окислитель — металл. Такого рода задачи возникают при рассмотрении горения последовательных запрессовок гетерогенных составов, склеенных зарядов и в других приложениях.

Эксперименты проводились с цилиндрическими образцами диаметром 10 и длиной 4 мм, спрессованными под давлением 5000 кгс/см². Зажигание образцов производилось мощным световым потоком от ксеноновой лампы ДКсР-10 000. Для повышения воспроизводимости зажигания и улучшения однородности образцов во все составы сверх 100% были введены сажа 1% и идитол 2%. Подготовка образцов к экспериментам включала тщательное броширование плотно прижатых друг к другу с помощью специальных тисочков спрессованных таблеток исследуемых составов. Для этой цели боковую поверхность образцов последовательно обмазывали слоями линолуума и эпоксидной смолы с наполнителем из окиси магния.

Во время горения составных образцов регистрировались сигналы реактивной силы продуктов сгорания по методике [2], а также записывались сигналы фотодиодов, фиксирующих интенсивность свечения пламени. По изменениям амплитуд сигналов во времени производились классификация и количественная оценка параметров переходных процессов. Качество контакта составных образцов проверялось в опытах по горению таблеток идентичного состава. Во всех испытаниях такого рода переходы осуществлялись без заметных задержек и изменений амплитуд сигналов реактивной силы.

Характеристики переходных режимов горения

Вид перехода	1К/2К	4К/3К	2К/3К	2К/5К	3К/1К	3К/2К	6М/6	7/3	1/3	2/5	6/4	3/1	7/3
$\Phi_{1,2}$	0,7	1,5	1,8	1,3	0,8	0,6	2,9	2,6	1,1	0,9	0,6	0,9	5,3
$\Delta H_{1,2}$	1,7	1,1	0,8	1,2	0,8	1,3	0,3	0,2	1,3	1,5	0,9	0,8	0,1
$t_{п}, c$	0	0	0,1	0,03	0,3	0,3	1	∞	0	0	0,1	0,1	∞
$P, атм$	1	1	1	1	1	1	1	1	10	10	10	10	10

Примечание. 1. Образцы 1, 2, 3 — смеси Mg + NaNO₃, избыток окислителя 0,5; 1; 3 соответственно. 2. Образцы 4, 5, 6 — смеси Mg + Ba(NO₃)₂, избыток окислителя 0,5; 1; 3 соответственно. 3. Образец 7 — перхлорат аммония + салициловая кислота (стехиометрическая смесь). 4. Индекс К — частицы Mg диаметром $d < 200$ мкм, индекс М — частицы (Mg $d < 40$ мкм), без индекса — смесь (50/50) частиц Mg ($d < 100$ и 200 мкм).