

К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ БРИКЕТИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Вимірена теплота згорання брикетованого палива на основі соломи (як чистої, так і з домішками вугілля, парафіну і відходів нафтопродуктів). Встановлено, що присутність домішок в зразку збільшує її значення (від 17,2 кДж/кг до 21 кДж/кг). На основі моделі пористого брикету в формі циліндру, пронизаного вздовж осі системою паралельних каналів певного радіуса, та в припущенні, що швидкість згорання – найменша в багатостадійному процесі, показано, що в залежності від числа каналів та значення їх радіуса час реакції може бути істотно скорочений (більш, як на порядок). Внутрішня реакційна поверхня зразка при цьому $\sim\sqrt{n}$, де n – число каналів.

Измерена теплота горения брикетированного топлива на основе соломы (как чистой, так и с примесями угля, парафина и отходов нефтепродуктов). Установлено, что наличие примесей в образце увеличивает ее значение (от 17,2 кДж/кг до 21 кДж/кг). На основе модели пористого брикета в форме цилиндра, пронизанного вдоль оси системой параллельных каналов определенного радиуса, и в предположении, что скорость горения – наименьшая в многостадийном процессе, показано, что в зависимости от числа каналов и значения их радиуса время реакции может быть существенно сокращено (более, чем на порядок). Внутренняя реакционная поверхность образца при этом $\sim\sqrt{n}$, где n – число каналов.

Measurements of briquette fuel on the straw basis (both clean and with additives of coal, paraffin and waste of oil) combustion heat. It is established that the presence additives in the sample increase its the value (from 17,2 kJ/kg to 21 kJ/kg). On the basis of porous briquette model in the form of a cylinder, which is pierced along axis by a system of parallel channels of a certain radius, and making an assumption, that a speed of combustion is the least in a multistage process, it is shown, that depending on a number of channels and value of its radius, a time of reaction may be considerably shortened (greater than by an order). The inside reaction surface of a sample at this $\sim\sqrt{n}$, where n is a number of channels.

A – средний стехиометрический коэффициент реакции горения;

a – константа;

c – теплоемкость брикета;

h – теплота испарения;

$Ko = q_0/c(T_b - T_0)$ – аналог критерия Коссовича,

L – длина брикета;

M_t – масса соломы, сгоревшей к моменту времени t ;

n – число каналов;

Q – тепло, выделившееся к моменту времени t ;

Q_0 – тепло, выделяемое в единицу времени в процессе горения;

Q_0^* – количество тепла, выделившегося при сгорании сплошного брикета (без каналов);

q_0 – теплота горения;

q_b – удельная теплота горения, измеренная по количеству тепла, выделившегося в калориметрической бомбе;

q_h – высшая удельная теплота горения;

q_u – низшая удельная теплота горения;

R – радиус цилиндра, включающего и канал, и массу вещества, окружающего данный канал;

R_0 – радиус образца брикета;

r – текущий радиус канала;

r_0 – начальный радиус канала;

S – площадь поперечного сечения канала;

S_0 – площадь поперечного сечения канала в начальный момент времени;

T – температура сплошной части брикета;

T_b – температура горения поверхности, равная температуре газов в канале;

T_0 – температура на внешней границе сплошной части цилиндра, окружающего канал;

t – текущее время;

t^* – время полного сгорания брикета;

V_0 – объем сплошного брикета (без каналов);

V_k – суммарный объем всех каналов, $x = r/R$;

$\Gamma = \rho dr/dt$ – массовая скорость горения;

ρ – плотность брикета;

λ – коэффициент теплопроводности брикета;

χ – коэффициент температуропроводности брикета;

ζ – координата подвижной поверхности горения.

Индексы:

0, b, h, k, t, u – нижние индексы;

* – верхний индекс.

Интерес к использованию соломы как вида топлива в последнее время заметно повысился. В этой связи возникли и определенные проблемы, связанные как ее с транспортировкой, так и с выбором определенных режимов ее горения. Первая задача решается с помощью брикетирования. Размеры и форма брикетов могут быть различными [1] в зависимости от требований заказчика, и эта проблема в целом решена. Что же касается режимов горения и вообще его механизма, то здесь ситуация выглядит намного сложнее. По своему молекулярному составу солома существенно отличается и от угля, и от газа, процессы горения которых в достаточной степени изучены. Например, содержание [1] углерода и кислорода в угле составляет (в массовом отношении) 59% и 7% соответственно, в то время как в соломе эти величины примерно одинаковы (43% и 38%). Очевидно, что этот фактор должен оказывать существенное влияние и на сам механизм горения. Но если при горении угля (при $T < 1500$ К) основной считается реакция окисления углерода при адсорбции кислорода поверхностью с образованием при этом двуоксида углерода CO_2 , и реакция протекает на горячей поверхности [2], то при горении соломы полной ясности нет: идет ли вначале полное испарение (термолиз) всей поверхности и реакции окисления протекают в объеме, или имеет место частичная адсорбция окислителя поверхностью с последующим горением на ней же (так называемое горение твердого топлива, когда и окислитель, и горючий компонент находятся в твердом состоянии). Нет понимания и в том, какую реакцию следует считать основной, с тем, чтобы провести хотя бы качественные оценки. Наконец, большое количество летучих компонентов серьезно затрудняет анализ самого процесса.

Для практических целей необходимы, в первую очередь, сведения о значении теплоты горения брикетированного топлива и причинах, влияющих на скорость реакции. В отличие от литературных данных [1] в ИТТФ НАН Украины измерения теплоты горения были выполнены не только для чистой соломы, но и для композиционных смесей из соломы и отходов нефтепродуктов, тонкодисперсных отходов каменного уг-

ля, парафина. Исследования проводились с помощью кондуктивного бомбового изопереболического калориметра КТС-2 [3], предназначенного для определения тепла, выделяемого при сгорании топливной пробы в укомплектованной с КТС-2 универсальной калориметрической бомбе БКУ-1. Определение выделяемого тепла проводилось интегральным способом [3]. Помимо этого, были проведены расчеты удельных высшей (с учетом поправок на образование и растворение серной и азотной кислот) и низшей (поправки, учитывающие теплоту парообразования при 25 °С из расчета на 1% испаряемой воды, а также на наличие водорода и степени влажности образца) теплот горения. В таблице 1 приведены некоторые результаты измерений. В последних двух строках (образцы 8 и 9) приведены данные, когда образец содержит двойную добавку. Из таблицы видно, что их наличие увеличивает величины теплот горения, причем, как оказалось, зависимость последних от концентрации примесей – линейная. Наиболее значительный рост установлен (расчетом) при одновременном 7% и 23% содержании парафина и угля соответственно (q_h возрастает до 23 мДж/кг). Эти данные коррелируют с таковыми в [1].

В [4] исследована зависимость скорости горения низкосортного антрацитового штыба (АШ) и СШ¹ от концентрации различных добавок: гранул из лузги подсолнечника и древесных отходов. Выявлено, например, что она возрастает с ростом концентрации гранул лузги и наибольшее ее значение достигается при их 60% содержании в топливной смеси, т.е. увеличение скорости горения достигается добавлением к низкорекреационному топливу (АШ и СШ) высокорекреационного (биогранул). Между тем, увеличение или уменьшение скорости горения для брикетированного топлива может быть достигнуто просто увеличением поверхности реакции, которая для брикетированных образцов может быть развита как за счет их пористости (при определенной степени сжатия), так и просверливанием в них некоторого числа каналов. Очевидно, этот фактор может определять и режим горения, т.е., регулируя каким-либо образом поверхность реакции, можно

¹СШ – семечковый штыб-уголь с размерами частиц от нуля до 12...13 мм

Таблица 1.

№ образца	Содержание, %							Теплота горения, кДж/кг		
	солома	уголь	парафин	отходы нефтепр.	сера	водород	влажность	q_b	q_h	q_u
1	100	0,00	0,00	0,00	0,13	5,20	8,3	17234	17193	15855
2	98,04	0,00	1,96	0,00	0,13	5,38	8,14	18239	18198	16824
3	95,24	0,0	4,76	0,00	0,12	5,64	7,91	18120	18079	16655
4	86,96	13,04	0,00	0,00	0,22	4,98	7,75	18064	18014	16738
5	80,00	20,00	0,00	0,00	0,26	4,86	7,46	19606	19552	18309
6	98,04	0,00	0,00	1,96	0,13	5,25	8,33	17601	17560	16211
7	96,15	0,00	0,00	3,85	0,13	5,30	8,37	17295	17884	16524
8	78,74	19,69	1,57	0,00	0,26	5,01	7,34	19331	19277	18004
9	83,33	12,50	4,17	0,00	0,21	5,37	7,43	19288	19239	17885

обеспечить и постоянство выделяемого в единицу времени тепла. Покажем это, не детализируя механизм процесса, но предполагая, что горение протекает на твердой поверхности.

Предположим, что брикет цилиндрической формы пронизан вдоль своей оси системой сквозных параллельных каналов радиуса r_0 , число которых n , а также, что рассматриваемый процесс определяется тепломассопереносом в одном канале. Будем также полагать, что стадия реакции (т.е. изменение радиуса поперечного сечения канала) в этом многостадийном процессе самая медленная. Последнее предположение означает, что в течение всего процесса вся внутренняя поверхность канала находится в равных условиях, и скорость горения одинакова по всей его длине. Этот факт имеет и экспериментальное подтверждение. В работах [5, 6] с помощью оптических методов показано, что при так называемом конвективном горении твердого топлива в канале с открытым противоположным концом после воспламенения достаточно быстро устанавливается постоянная скорость фронта по всей его длине.

Предположим, что существует такой режим, при котором скорость выделения тепла Q в единицу времени постоянна, т.е. $dQ/dt = Q_0 = \text{const}$. Анализ показывает, что такое возможно, если площадь S поперечного сечения канала меняется во времени как $S = S_0 + \pi r t$. Это, в свою очередь, приводит к следующей зависимости скорости изменения радиуса r канала:

$$dr/dt = a/r. \quad (1)$$

Значение константы a будет определено ниже. Если в брикете n каналов, то количество выгоревшего в брикете вещества за время t запишется как $M_t = 2\pi r n L t$. Тогда при теплоте q_0 горения $Q = 2\pi r n q_0 L$. Поэтому с учетом высказанного предположения имеем, что

$$n = Q_0 / 2\pi r n q_0 L. \quad (2)$$

Исходя из (2) и выражения для M_t , нетрудно вычислить и время t^* выгорания брикета:

$$t^* = t_0^* (V_0 / V_k - 1). \quad (3)$$

Здесь $t_0^* = r_0^2 / 2a$ и, как видно из (3), $t_0^* = t^*$, если $V_0 = 2V_k$. Комбинируя (2), (3) и последнее условие, получим, что

$$r_0 = \sqrt{2aQ_0^* / Q_0}. \quad (4)$$

Вычислим теперь константу a . Предположим, что сплошной объем топлива, окружающий каждый канал, имеет форму цилиндра радиуса R , и при этом $R \gg r$. Пусть также температура образовавшихся газов в канале (это соответствует высказанному выше предположению о самой медленной стадии процесса) равна температуре горячей поверхности. Тогда граничное условие на этой поверхности должно учитывать как количество теплоты, выделившееся за счет горения, так и тепло, необходимое для испарения молекулы, образовавшейся в результате реакции. По-

Таблица 2.

	$R_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$R_0 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; L = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м}$
$Q_0, \text{ Дж/с}$	10^4	10^5
n	660	550
$t^* = t_0^*, \text{ с}$	0,85	40,35
$r_0, \text{ м}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
$Q_0, \text{ Дж/с}$	10^3	10^4
n	66	55
$t^* = t_0^*, \text{ с}$	8,5	400,35
$r_0, \text{ м}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,77 \cdot 10^{-3}$
$Q_0, \text{ Дж/с}$	10^2	$3,3 \cdot 10^3$
n	7	18
$t^* = t_0^*, \text{ с}$	85	1200
$r_0, \text{ м}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$

этому [7] на подвижной горящей поверхности $r = \xi$ имеем:

$$\lambda \partial T / \partial \xi = \Gamma (q_0 / A - h) = \rho (q_0 / A - h) d \xi / dt .$$

Полагая [7], что при температурах порядка 1000 К $q_0 / A \gg h$ и $A = 1$ (для простоты), имеем

$$\lambda \partial T / \partial \xi = \rho q_0 d \xi / dt . \quad (5)$$

В таком виде задача о распределении температуры в сплошной части цилиндра, окружающей канал, аналогична задаче Стефана [8] о промерзании грунта. Исходя из ее решения (в стационарном приближении [8]), находим, что перемещение подвижной границы $r = \xi$ подчиняется уравнению

$$dr/dt = \lambda (T_b - T_0) / q_0 \rho r \ln (R/r) .$$

Так как $R/r \gg 1$, то, заменяя функцию $x \ln x$ на $-x$ при $x \rightarrow 0$ (средняя ошибка при этом на интервале $[0, e^{-1}]$ не превышает 30%) и полагая $c(T_b - T_0) / q_0 = Ko^{-1}$, $\lambda / c \rho = \chi$, перепишем последнее уравнение как $dr/dt = \chi / r \cdot Ko$. Сравнивая его с (1), находим, что

$$a = \chi / Ko . \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения λ и c для березы (данные о величине параметра χ для соломы в ли-

тературе отсутствуют) и полагая $\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, находим, что $a = 7,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. В табл. 2 приведены некоторые результаты вычислений r и n на основе уравнений (2)-(4) и (6) и определенных Q_0 для двух образцов с разными R_0 и L и $q_0 = 17 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$. Времена горения сплошных брикетов при одинаковой массовой Γ скорости, равной, например, $0,1 \text{ кг/м}^2\text{с}$, составят примерно 200 и 2400 с соответственно. Значение же внутренней реакционной поверхности пропорционально \sqrt{n} .

В заключение отметим, что приведенные расчеты следует рассматривать, естественно, как оценочные, но они подтверждают очевидный физический тезис о влиянии развитости поверхности реакции на скорость горения. Кроме того, наличие каналов в брикете может снять и ограничения на конструкцию котлов, в которых сжигаются эти брикеты. В частности, возможно, не потребуется изменения размеров топочного пространства для увеличения скорости горения. Во всяком случае, каналы — это дополнительный фактор, позволяющий расширить выбор определенного режима данного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гелтуха Г.Г., Железная Т.А. Обзор технологий сжигания соломы с выработки тепла и эле-

ктроэнергии // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1998. – № 6. – С.3–4.

2. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 174 с.

3. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания // Инж.- физ. журнал. – 1977. – Т.70, №5. – С. 828–839.

4. Михалев А.В., Кузьмин С.Н., Исьемин Р.Л., Коняхин В.В., Красавцев В.В., Зорин А.Т. Исследование сжигания антрацитового штыба и биогранул в отопительном котле с топкой с

высоко-температурным кипящим слоем // Пром. теплотехника. – 2006. – Т.28, №1. – С. 64–68.

5. Беляев А.Ф., Боболев В.К. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. – М.: Наука, 1973. – 250 с.

6. Смирнов Н.Н. Конвективное горение в каналах и трещинах в твердом топливе // Физика горения и взрыва. 1985. – № 5. – С. 29–36.

7. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. – М.: МГУ, 1987. – 308 с.

8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.