

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемерис И.Ф. Технико-экономические аспекты работы шахтных энергетических комплексов // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 1999. – Вып. 15. – С. 55 – 61.
2. Булат А. Ф., Чемерис И.Ф., Перепелица В.Г., Подтуркин Д.Г. Когенерационные технологии – прогрессивный путь решения проблем энергопотребления и энергосбережения в промышленных регионах Украины. // Энергозберігаючі технології та автоматизація: Держжоменергозбереження України. - Київ, 2002. - №2 (26). - с.44 – 46.
3. Чемерис И.Ф. Экономические показатели работы шахтного энергокомплекса с учетом энергетической характеристики угледобывающего предприятия. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 21. – С. 63 – 68.
4. Авилов – Карнауков Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. – М.: Недра, 1969. – 96с.

УДК 622.612.12:662.87

Канд. техн. наук **Е.Ю. Пигида**, инж. **Я.А. Пристай**,  
д-р техн. наук **Л.М. Васильев** (ИГТМ НАН Украины)

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ**

Представлені результати теоретичних досліджень процесу нагріву вугільного пилу в камері згорання термоінструменту. Показана можливість створення малогабаритних генераторів високотемпературних газових струмін з двухстадійним спалюванням в камері палива: стиснене повітря-вугільний пил. Приведені проектні значення параметрів, котрі може забезпечити генератор при використанні такої камери спалювання.

### **THE DEFINITION OF PARAMETERS OF THE BURNING CAMERA FOR COAL DUST IN THE HEAT GENERATORS**

The results of theoretical researches in the chamber of combustion thermo tool are submitted. The opportunity of creation of small-sized generators of high-temperature gas jets with two-stage by burning in the chamber of fuel: the compressed air-coal dust is shown. The design meanings of parameters are given which can be ensured with the generator at use of such chamber of combustion.

В связи со значительным ростом потребления твердого топлива в энергетических целях актуальной становится задача создания мобильных высокоэкономичных специализированных агрегатов. Создание газоструйных теплогенерирующих устройств с камерами сгорания позволяет рассмотреть применение в качестве топлив всех горючих веществ, которые способны выделять с известной скоростью необходимые количества энергии. Твёрдые топлива можно рассматривать с той же самой точки зрения, что и обычные жидкие и газообразные топлива. Многие характеристики процесса горения твёрдых топлив подобны характеристикам жидких и газообразных топлив. Важными характеристиками являются количество энергии, выделяемой в результате химической реакции, температура пламени, а также природа продуктов сгорания, так как тяга теплогенерирующего устройства (термоинструмента) зависит от количества движения потока выбрасываемых газов.

Имеется большое количество работ, посвящённых исследованию механизма горения угля вместе с жидким топливом-носителем или взвешенного в газозводушном потоке [1].

Изучение горения углерода в камере сгорания показало, что его окисление сопровождается газификационным процессом. Процесс сгорания углерода протекает по следующим первичным реакциям:



Многочисленными опытами доказано, что уголекислота  $CO_2$  и окись углерода  $CO$  образуется одновременно. Количественное соотношение  $CO$  и  $CO_2$  зависит от режимных условий. Так, при температуре до 1570К отношение  $CO : CO_2 = 1$ , а при повышении температуры оно увеличивается.

Почти всегда при горении углерода, кроме первичных реакций, протекают и вторичные:



Из написанных выше реакций три являются гетерогенными, а последняя – гомогенной.

Частица угля, движущаяся в газо-воздушном потоке камеры сгорания, быстро разогревается и из неё бурно выделяются летучие вещества, сгорающие в топочном объёме. Процесс горения условно разбивается на две стадии: подогрев смеси воздуха и угольной пыли до температуры воспламенения (с одновременным пирогенетическим разложением топлива) и собственно процесс горения летучих и кокса. На поверхности частицы одновременно горит и газифицируется кокс (углерод). Скорость прогрева и окисления кокса зависит от удельной поверхности взвешенного топлива, которая очень велика. Так, удельная поверхность угля при диаметре частиц  $d = 30\text{мкм}$  составляет  $50\text{ м}^2/\text{кг}$ , что в 1000 раз превышает удельную поверхность кускового угля (отдельные куски диаметром  $30 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ).

Воспламенение твёрдых топлив во многом зависит от тех же факторов, которые являются важными и при воспламенении жидких и газообразных топлив. Топливо и окислитель получают энергию от источника воспламенения до тех пор, пока температура станет такой, что реакция пойдёт самопроизвольно. Температура, при которой происходит воспламенение, в большей степени определяется скоростями реакций. Процесс воспламенения может осуществляться либо путём использования местных источников энергии высокой интенсивности, например таких, как искра, нагретый стержень или химический воспламенитель, либо путём использования большого количества тепла при наименьшем уровне энергии, например при нагревании топливовоздушной смеси стенками камеры сгорания. Энергия, требующаяся для воспламенения, будет функцией типа топлива, формы камеры сгорания, а также источника воспламенения.

Воспламеняемость пылевого облака угля, содержащего частицы различных размеров, будет определяться частицами наименьших размеров, так как они воспламеняются наиболее легко.

Получение твёрдым топливом тепла от газа и стенок камеры сгорания (подогрев холодного топлива до температуры воспламенения) в результате излучения и теплопроводности является существенным не только для процесса воспламенения, но также и для самого процесса горения. Поэтому были выполнены теоретические исследования по вопросу теплового воспламенения на основании упрощённых моделей этого процесса. Ниже будет рассматриваться главным образом процесс воспламенения одной частицы угля в отличие от более общей проблемы воспламенения пылевых облаков.

Математическое моделирование процесса теплового воспламенения сферической угольной частицы, взвешенной в потоке высокотемпературного газа, основывалось на решении уравнений теплообмена в сопряжённой постановке, т.е. одновременно для газовой и твёрдой фаз. Весьма важным упрощением задачи может быть предположение о том, что газовая и твёрдая фазы находятся в динамическом равновесии, т.е. у них нет запаздывания по скорости. Тогда время пребывания твёрдой фазы в камере сгорания можно приравнять времени пребывания продуктов сгорания.

Количества тепла, поглощённого твёрдой частицей в камере сгорания, складывается из двух частей: тепла, передаваемого в результате непосредственного соприкосновения газа и твёрдой частицы или так называемой конвективной части, и тепла, передаваемого путём излучения газа или так называемой радиационной (лучистой) части. Отсюда

$$\begin{aligned} q_T &= q_k + q_p, \\ T_T &= T_k + T_p, \end{aligned}$$

где  $q_k$  и  $q_p$  – конвективный и радиационный тепловые потоки, Вт;  $T_k$  и  $T_p$  – конвективная и радиационная температуры частицы, К.

Расчёт температуры путём конвекции между частицами угля и газом проводился на основе рассмотрения энергетического баланса приравниванием скорости увеличения количества внутренней энергии частицы и скорости передачи тепла от газа к частице

$$\left( \frac{4}{3} \pi r_T^3 \rho_T \right) c_T \frac{dT_T}{dt} = \alpha_r (4 \pi r_T^2) (T_r - T_T),$$

или

$$\frac{dT_T}{dt} = \frac{3\alpha_r}{r_T \rho_T c_T} (T_r - T_T), \quad (1)$$

где  $t$  – время пребывания твёрдых частиц в камере сгорания, с;  $r$  – радиус, м;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от газа к частице, Вт/(м<sup>2</sup>·К). Индексы: г – газ; т – твёрдая частица.

После интегрирования уравнение (1) принимает вид

$$\frac{T_g - T_{гн}}{T_g - T_t} = \exp\left(\frac{3\alpha_r \tau}{\rho_r r_t c_r}\right), \quad (2)$$

где  $T_{гн}$  – температура твёрдой частицы в начале камеры сгорания, К.

Радиационная температура частицы определяется из уравнения скорости подвода энергии излучением

$$dE_H/d\tau = 4\pi r_t^2 \varepsilon_t \varepsilon_g c_0 T_g^4$$

где  $\varepsilon_t$  и  $\varepsilon_g$  – коэффициенты соответственно черноты частицы и излучательной способности газа;  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела,  $c_0 = 5,76 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для сферических частиц скорость нарастания температуры

$$dT_t/d\tau = 3\varepsilon_t \varepsilon_g c_0 T_g^4 / (\rho_t c_t r_t).$$

Интегрируя от начальной температуры  $T_{гн}$  до температуры  $T_t$ , по истечении времени  $\tau$  получаем

$$T_t = T_{гн} + 3\varepsilon_t \varepsilon_g c_0 T_g^4 / (\rho_t c_t r_t) \tau. \quad (3)$$

Угольные частицы, вводимые в камеру сгорания термоинструмента вместе с воздухом, участвуют в реакции окисления и могут приобретать на входе в сопло температуру, равную температуре продуктов сгорания. Поэтому первостепенной задачей является определение температуры твёрдой фазы на входе в сопло, необходимой для расчёта параметров сверхзвукового двухфазного потока.

Время пребывания угольной частицы в камере сгорания находим из соотношения

$$\tau = V_K P_K / R T_g m_r,$$

где  $V_K$  – объём камеры сгорания, м<sup>3</sup>;  $P_K$  – давление газа в камере сгорания, Па;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $m_r$  – расход газа, кг/с.

Для термоинструмента ТБВ-56 (показатели:  $m_r = 0,06$  кг/с;  $T_g = 2170$  К;  $\alpha_r = 5000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W_r = 54,5$  м/с;  $d_{сп} = 16 \cdot 10^{-3}$  м;  $d_K = 39 \cdot 10^{-3}$  м;  $l_K = 0,25$  м) время пребывания угольной частицы диаметром  $d_r = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м в камере сгорания равно  $4,5 \cdot 10^{-3}$  с. Тогда конвективная и радиационная температуры

частицы, вычисленные по формулам (2) и (3), равны соответственно 1585 К и 360 К, а температура, которую приобретает угольная частица в камере сгорания,  $T_T = 1945$  К. Уравнение (2) показывает, что с уменьшением радиуса частицы скорость подвода тепла увеличивается и, естественно, возрастает температура нагрева частиц. Как показали расчеты, температура самых малых угольных частиц, которые могут быть применены в качестве топлива для термоинструмента, достигает в камере температуры сгорания пылевоздушной смеси ( $T_{max} = 1970$  К).

Представляет интерес определение времени пребывания угольных частиц в камере термоинструмента при условии их полного сгорания, т.е. рассматривается случай работы термоинструмента на пылевоздушной смеси, когда температура продуктов сгорания составляет  $T_s \approx 1800$  К. Время пребывания частиц в камере сгорания состоит из времени нагрева до температуры воспламенения частицы и собственно времени горения угольной частицы с образованием  $CO_2$ . Необходимость определения времени пребывания частиц в камере сгорания вызвана тем, что оно является важным исходным данным для расчета геометрических параметров камеры сгорания термоинструмента, работающего на твердом топливе.

Время нагрева угольных частиц до температуры воспламенения  $T_a = 980$  К [2] определяется из уравнения (2), которое записывается в виде

$$\ln \frac{T_T}{T_T} \frac{T_{T.H.}}{T_T} = \frac{3\alpha_T \tau}{\rho_T r_T c_T}$$

Коэффициент теплоотдачи от газа к угольным частицам определяется из уравнения

$$Nu = 2 + c Re_T^n Pr^m, \quad (4)$$

где  $c, m, n$  - сохраняют постоянное значение в определенном диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_T$ ;  $Nu, Pr$  - критерии Нуссельта и Прандтля.

При низких концентрациях материала, когда столкновения между частицами в потоке незначительно влияют на скорость мелких частиц и, следовательно, относительная скорость последних невелика, конвективная составляющая в уравнении (4) для частиц размером до 200 мкм не играет существенной роли, и в этом случае можно принимать  $Nu=2$ . Тогда при изменении  $\alpha_T$  от 1000 до 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) (реальный случай при работе термоинструмента ТБВ-56 на различных режимах) время нагрева угольных частиц диаметром  $d_T = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м уменьшается от 0,0113 с до 0,0023 с. При этом длина камеры сгорания составит соответственно 0,615 м и 0,125 м.

Время горения угольных частиц размером  $d_T = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м составляет 0,055 с [3]. Следовательно, общее время пребывания угольной частицы в камере до ее полного сгорания равно 0,06 с, а длина камеры сгорания составит  $l_k = 3,27$  м.

Расчеты показывают, что в камере сгорания термоминструмента ТБВ-56 ( $l_k = 0,25$  м) не происходит полное сгорание частиц угля. Выполнение термоминструмента с камерой сгорания длиной  $l_k = 3,27$  м нецелесообразно ввиду невозможности организации ее надежного воздушного охлаждения.

Существует способ достижения полного сгорания твердого топлива в камере, в основу которого положено повышение температуры продуктов сгорания при надежном охлаждении камеры, т.е. организация двухстадийного сжигания твердого топлива в двухкамерном термоминструменте. Это достигается за счет смешения продуктов неполного сгорания твердого топлива с плазменной газовой струей или подогретым окислителем воздухом и последующего достижения топливной смеси во второй камере термоминструмента.

В результате исследований установлено, что смешение газовой струи химической горелки ( $m_T = 0,06$  кг/с;  $T_T = 1500$  К) с плазменной струей ( $m_T = 0,007$  кг/с;  $T_T = 3270$  К) позволит получить высокотемпературную газовую струю ( $T_T = 1655$  К), в которой происходят вторичные реакции: восстановление углекислоты  $C + CO_2 = 2CO$ ; образование водяного газа  $C + H_2O = CO + H_2$ ; конверсия углекислоты и водорода  $CO_2 + H_2 = CO + H_2O$ . Подача в камеру сгорания дополнительного окислителя воздуха будет способствовать завершению процесса окисления углерода до образования  $CO_2$  с максимальной температурой  $T_{max} \approx 2000$  К.

Двухстадийное сжигание твердого топлива в химической горелке позволит получить газовую струю с высокими тепловыми параметрами, так как в качестве окислителя для дожигания продуктов неполного сгорания используется подогретый сжатый воздух (хладоагент первой камеры). Если предположить, что температура продуктов сгорания в первой камере составляет  $T_T = 1800$  К, а поступающие в камеру сгорания угольные частицы приобретают только температуру воспламенения  $T_0 = 1000$  К, то для нагрева частиц во второй камере до температуры вторичных реакций (например,  $T_T = 1700$  К) требуется время  $\tau = 0,0076$  с. При этом длина второй камеры сгорания составит  $l_k = 0,4$  м. В этом случае возможно организовать надежное воздушное охлаждение камеры сгорания.

**Вывод.** Анализ теоретических исследований процесса горения пылевидного углеродного топлива в камере термоминструмента показывает, что в основу разработки полноразмерных генераторов высокотемпературных газовых струй, работающих на твердом топливе, должен быть положен способ двухстадийного сжигания, при котором обеспечивается максимальная полнота сгорания топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокофорсированные огневые процессы / Под ред. М.А. Наджарова, - М. - Л.: Энергия, 1967. - 296 с.
2. Теплотехника / Под ред. И.Н. Суцкина, - М.: Металлургия, 1973. - 479 с.
3. Герштейн М., Коффи К. Горение твердых топлив // Процессы горения. - М.: Физматгиз, 1961. - С. 372 - 391.