

Л.М. Васильев, докт. техн. наук,
Е.Ю. Пигида, канд. техн. наук,
С.В. Демченко, м.н.с.
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ НА ЕЕ ТЕЧЕНИЕ В СОПЛЕ ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛА

Розглянуто процес горіння пилоподібного вуглецевмісного палива в камері газоструминного генератора з метою наступного виробітку теплової і електричної енергій. Отримана залежність молекулярної маси продуктів згорання вугілля від коефіцієнта надлишку окислювача. Приведені результати розрахунків параметрів комбінованого сопла, тобто другої камери згорання генератора тепла.

THE RESEARCHING OF THE THERMODYNAMIC PARAMETERS INFLUENCE OF TWO-PHASE MIXTURE ON ITS FLOW IN THE NOZZLE OF HEAT GENERATOR

The combustion process of coaly powdered fuel in gas-jet generator chamber was considered for the purpose of post generation of heat and electrical energy. The dependence of coal combustion product molecular weight on excess oxidant. The output computation of combined nozzle parameters, that is secondary combustion chamber of heat generator, was demonstrated.

В применяемых в настоящее время в народном хозяйстве теплогенерирующих устройствах (ТГУ) малой мощности топливо сжигается в топках, как правило, с естественной тягой или при вентиляционном напоре воздуха. Такие ТГУ конструктивно просты, что и обусловило их широкое распространение [1]. Однако они имеют ряд недостатков, основными из которых являются следующие:

-малая величина теплонапряженности топочного объема (до 1 МВт/м²), что приводит к большим относительным затратам при создании ТГУ;

-ухудшение полноты сгорания при увеличении теплонапряженности топочного объема, что ограничивает пределы регулирования;

-низкое давление продуктов сгорания на выходе из топки, приводящее к тому, что процессы по использованию тепла проходят с низкой эффективностью (например, коэффициент теплообмена от продуктов сгорания к теплообменным поверхностям составляет от 20 Вт/(м²·К) до 40 Вт/(м²·К).

Поэтому в промышленной теплотехнике намечается тенденция к применению в ТГУ силовых топков [1]. Внутрикамерные процессы в таких топках идут при повышенных давлениях (до 1МПа), а продукты сгорания истекают с околозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями.

Высокоскоростное струйное натекание продуктов сгорания на поверхности нагрева повышает эффективность процессов теплообмена [2]. Благодаря струйному характеру теплового воздействия коэффициент теплоотдачи увеличивается в несколько раз и достигает от 800 Вт/(м²·К) до 1200 Вт/(м²·К) [3].

Высокоскоростное истечение продуктов сгорания дает возможность орга-

низовать интенсивную циркуляцию в рабочем объеме и создать печи высокоскоростного нагрева.

Известны другие технологические процессы, где используются камеры сгорания высокого давления, такие, как термическое бурение, добыча и обработка гранита, получение металлических порошков, высокотемпературная очистка поверхностей, имитация аэродинамического нагрева и др. [4].

Однако возможность эффективного применения теплогенерирующих устройств малой мощности с силовой топкой или с камерой сгорания высокого давления можно существенно увеличить путем значительного расширения диапазона температуры продуктов сгорания, создания компактных высокоэффективных теплообменников, изменения физико-химических свойств продуктов сгорания, добавлением в них различных веществ, а также применения в качестве топлива при сжигании в камере сгорания под давлением различных углеродсодержащих минеральных сред, в том числе углей различной степени метаморфизма.

Особый интерес представляет изучение процесса горения пылевидного углеродсодержащего топлива в камере газоструйного генератора с целью последующей выработки тепловой и электрической энергий. Из всех физико-химических превращений топлива в генераторах тепла процессу горения принадлежит определяющая роль. Исследования процесса воспламенения и выгорания монодисперсной пыли показали, что в условиях высоких температур газовой струи нагрев очень мелких частиц конвекцией и лучистой теплоотдачей происходит практически мгновенно. Самые мелкие частицы воспламеняются и выгорают очень интенсивно, при этом температура частиц практически одинакова с температурой газов.

Процесс термической переработки топлива, включаемый в большинство энерготехнологических схем, должен быть высокоинтенсивным и управляемым, позволяющим регулировать выход и качество получаемых продуктов, от которых зависит экономика энерготехнологического использования топлива.

При разработке высокоинтенсивных управляемых методов термической переработки твердых топлив и выборе оптимальных режимных параметров работы технологических аппаратов необходимо учитывать особенности всех процессов, именуемых место при нагреве полидисперсной массы угольного вещества. Изучению процессов теплообмена в газозвеси посвящено значительных работ, как в нашей стране, так и за рубежом [5, 6]. Следует отметить, что ранее в основном исследовали закономерности двухфазного потока, не осложненного химическими превращениями нагреваемых частиц. Современные задачи техники требуют изучения двухфазного потока с учетом влияния внутренних процессов переноса на закономерности кинетики термических превращений полидисперсных частиц.

Гетерогенные потоки, в том числе двухфазные газопылевые, широко представлены в природе и технике. В одних случаях такие потоки оказываются нежелательным явлением, вызывающим интенсивное эрозионное разрушение материалов и усложняющим создание образцов новой техники, в другие –

создаются специально в различных экспериментальных установках и технологических процессах. В нашем случае, когда в качестве топлива используется пылевидный уголь, при его сжигании в камере образуется двухфазная смесь (газ + твердые частицы), истекающая из сопла с большой скоростью ($W_{см} \geq 500$ м/с). В традиционной схеме генератора тепла (камера сгорания – сопло Лавала) двухфазная смесь вызывает серьезные затруднения, связанные с эрозионным размыванием минимального (критического) сечения сопла. Поэтому применение сопел Лавала в малых сверхзвуковых генераторах гетерогенных потоков нецелесообразно.

Решить проблему могло бы использование комбинированного сопла, в которое наряду с геометрическим осуществляются тепловое и расходное воздействия на газ, что позволяет отказаться от сужающегося участка в сверхзвуковом сопле.

Вызывает интерес особый случай течения газа в канале, реализующийся при распределенной некоторым образом по длине этого канала подаче дополнительного окислителя (воздуха) в поток продуктов неполного сгорания. В схеме двухкамерного генератора тепла, в котором осуществляется двухстадийное сжигание топлива (сжатый воздух + пылевидный уголь), таким каналом является вторая камера сгорания. Если в конце такого канала в потоке достигается местная скорость звука $a = \sqrt{\kappa RT}$ (где κ – показатель адиабаты; R – удельная газовая постоянная; T – температура газа), то он представляет собой дозвуковой участок комбинированного расходно-теплового сопла, по длине которого наряду с увеличением массового расхода и температуры продуктов сгорания происходит постепенный рост коэффициента избытка окислителя. Для топливной пары уголь-воздух повышение коэффициента избытка окислителя α_t от 0,5 до 1,0 приводит к изменению молекулярной массы продуктов сгорания μ от 26,9 кг/кмоль до 29,55 кг/кмоль (рис. 1), что означает уменьшение газовой постоянной в потоке $R = 8314/\mu$ на 9%. Температура продуктов сгорания при этом возрастает на 16%.

Таким образом, рост α_t от 0,5 до 1,0 сопровождается увеличением скорости звука в продуктах сгорания и их скорости истечения, что свидетельствует о дозвуковом истечении из канала. При этом для выполнения этого условия необходимо компенсировать расходное и тепловое воздействия геометрическим воздействием, то есть расширением рассматриваемого канала.

Учитывая, что тепловое воздействие определяется расходным (дополнительным подводом подогретого окислителя), можно установить зависимость геометрического фактора от расходного, то есть решить задачу профилирования канала, в котором осуществляется догорание продуктов неполного сгорания угля.

Для нахождения этой зависимости воспользуемся тем обстоятельством, что в диапазоне изменения α_t от 0,5 до 1,0 зависимость молекулярной массы газа μ от α_t аппроксимируется линейной функцией $\mu = A + B\alpha_t$. При $A = 24,2$ и $B = 5,35$ погрешность не превышает 3%. Тогда геометрические параметры ка-

нала можно определить по уравнению [7].

$$\bar{F} = \left(A - \frac{B}{V_0} + B \cdot \psi \right) \frac{\bar{G} (\bar{Q} \ln \bar{G} + 1)}{A - \frac{B}{V_0} + B \cdot \psi \cdot \bar{G}}$$

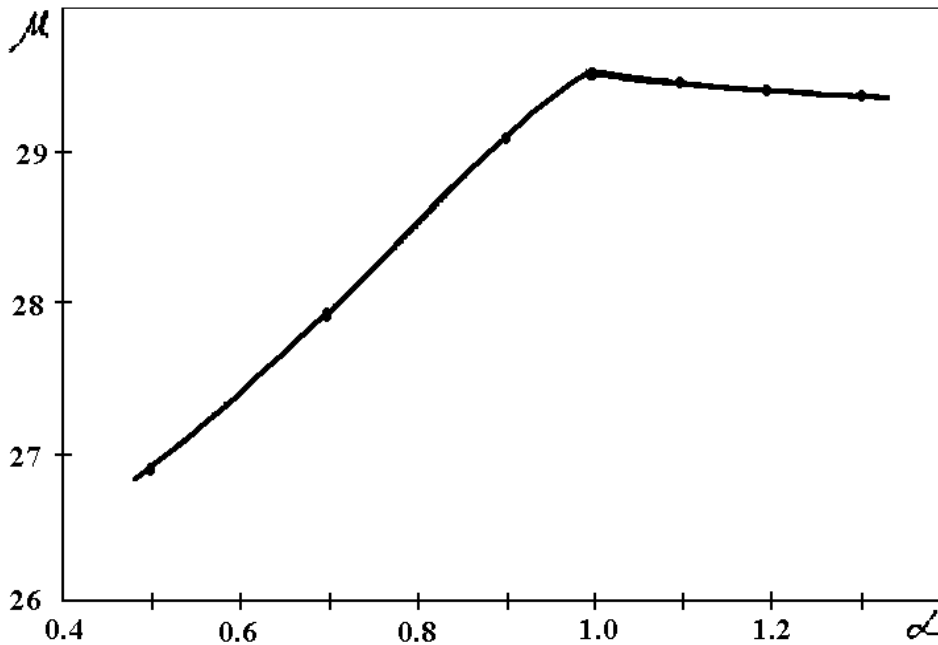


Рис. 1 – Зависимость молекулярной массы продуктов сгорания угля от коэффициента избытка окислителя

Здесь приведенные параметры имеют следующее обозначение: $\bar{F} = F/F_0$ – площадь поперечного сечения канала; $\bar{G} = G/G_0$ – расход газа; $\bar{Q} = Q_n^p / c_{p,cp} T_0$ – безразмерный тепловой параметр; $\psi = (1 + \alpha_0 V_0) / V_0$.

Индексом 0 обозначаются параметры газа в начальном сечении канала. Текущий расход в любом сечении канала

$$G = G_T (1 + \alpha_T V_0),$$

где G_T – расход топлива (угля), постоянный по длине канала.

Ниже приведены результаты расчета параметров комбинированного сопла, то есть второй камеры сгорания генератора тепла.

При исходных данных: $A = 24,2$; $B = 5,35$; $V_0 = 7,263 \text{ кг/кг}$; $T_0 = 1943 \text{ К}$; $c_{p,cp} = 1,503 \text{ кДж/(кг·К)}$; $Q_n^p = 23560 \text{ кДж/кг}$; $\alpha_0 = 0,7$; $G_T = 23 \text{ кг/ч}$ значение \bar{F} равно 4,275.

Определим время пребывания угольных частиц в камере термоинструмента при условии их полного сгорания, т.е. рассмотрим случай работы термоин-

струмента на пылевоздушной смеси, когда температура продуктов сгорания составляет $T_r \approx 1800$ 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 $T_6 = 980$ К [8] определяется из уравнения

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

где τ – время пребывания твёрдых частиц в камере сгорания, с; r – радиус, м; ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; α – коэффициент теплоотдачи от газа к частице, Вт/(м²·К); $T_{T.H.}$ – температура твёрдой частицы в начале камеры сгорания, К.

Индексы: r – газ; T – твёрдая частица.

Коэффициент теплоотдачи от газа к угольным частицам определяется из уравнения

$$Nu = 2 + c Re_T^n Pr^m \quad (1)$$

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 (1) для частиц размером до 200 мкм не играет существенной роли, и в этом случае можно принимать $Nu = 2$. Тогда при изменении α_r от 1000 Вт/(м²·К) до 5000 Вт/(м²·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 [2]. 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 термоинструмента ТБВ-56 ($l_k = 0,25$ м) не происходит полное сгорание частиц угля. Выполнение термоинструмента с камерой сгорания длиной $l_k = 3,27$ м нецелесообразно ввиду невозможности организации ее надежного воздушного охлаждения.

Двухстадийное сжигание твердого топлива в химической горелке позво-

лит получить газовую струю с высокими тепловыми параметрами, так как в качестве окислителя для дожигания продуктов неполного сгорания используется подогретый сжатый воздух (хладагент 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.

Для камеры сгорания с начальным диаметром $d_0 = 16 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $l = 0,4$ м диаметр в выходном сечении составляет $d_{вых} = 33 \cdot 10^{-3}$ м при этом угол раскрытия $\beta = 2^{\circ}26'$.

После достижения скорости звука газ попадает в расширяющийся канал, представляющий собой сверхзвуковую часть сопла, в которой на газ оказывается ускоряющее геометрическое и тепловое воздействие, определяемое длиной канала и его раскрытием.

Таким образом, анализ теоретических исследований процесса горения пылевидного углеродного топлива показывает, что в основу разработки полно-размерных генераторов высокотемпературных газовых струй, работающих на твердом топливе, должен быть положен способ двухстадийного сжигания. Второй камерой этих генераторов является комбинированное сопло, в котором наряду с геометрическим осуществляются тепловое и расходное воздействия на газ. Это позволяет отказаться от сужающегося участка в сверхзвуковом сопле и обеспечить максимальную полноту сгорания топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидельковский, Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юрнев. – М.: Энергоиздат, 1988. – 518 с.
2. Юдаев, Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.
3. Экономичность теплового воздействия струй в системах струйного нагрева : Сб. науч. тр. / С.Н. Акулов, А.П. Першин, А.П. Фурсов, В.В. Кулалаев // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. – Харьков: ХАИ, 1983. – С. 3-15.
4. Фурсов, А.П. Газоструйные тепловые установки для новых технологических процессов (ГСУ). Классификация ГСУ : Сб. науч. тр. / А.П. Фурсов // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. – Харьков: ХАИ, 1981. – С. 3-7.
5. Гусев, Н.З. К расчету нагрева полидисперсного угля в потоке газа / Н.З. Гусев // Химия твердого топлива. – М.: Наука, 1974. – №3. – С. 82-86.
6. Герштейн, М. Горение твердых топлив / М. Герштейн, К. Коффин // Процессы горения. – М.: Физматгиз, 1961. – С. 372-391.
7. Об одном случае течения газа в комбинированном сопле / В.М. Кисель, А.В. Чоба, Ю.И. Евдокименко, В.В. Пасичный // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. – Харьков, 1990. – С. 67-74.
8. Теплотехника / Под ред. И.Н. Сушкина. – М.: Металлургия, 1973. – 479 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. С.П. Мінєєвим 20.08.09.