

А.А. БАРАНОВ, С.В. КОРОЛЕВ, А.А. ПИРОЖЕНКО

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ АППАРАТА
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ
ЭЖЕКЦИОННОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Параметры теплоносителя на выходе из аппарата пульсирующего горения (АПГ) вследствие его высокой температуры в большинстве случаев не удовлетворяют требованиям по реализации технологических процессов, таких как нагрев, сушка и другие. Поэтому весьма актуальным является решение вопроса смешения продуктов сгорания на выходе из аппарата с холодным окружающим воздухом с целью обеспечения необходимой температуры теплоносителя и его расхода.

В этой связи наиболее перспективными и совершенными устройствами для смешения являются эжекторы. Конструкция эжекционного теплогенератора достаточно проста и включает аппарат пульсирующего горения, реализующий пульсирующий режим сжигания топлива, установленный полностью или частично (только выхлопное сопло) внутри эжектирующего кожуха цилиндрической или цилиндрикоконической формы. В таком теплогенераторе используется энергия высокоскоростной струи газа на выходе из АПГ для засасывания окружающего воздуха, смешения его с продуктами сгорания и создания необходимого избыточного давления на выходе.

Основной задачей проектирования эжекционного теплогенератора пульсирующего горения является расчет аппарата пульсирующего горения такой тепловой мощности, чтобы с учетом эжектруемого воздуха на выходе из теплогенератора получить заданный объемный расход теплоносителя $V_{см}$ и температуру $T_{см}$. Именно эти параметры являются определяющими условия проведения технологического процесса и являются исходными для проектирования теплогенерирующих устройств.

При смешении двух потоков с близкими давлениями и отсутствии внешнего теплообмена применительно к эжекционному теплогенератору будет иметь место следующий баланс энтальпий

$$G_{см}h_{см} = G_1h_1 + G_2h_2,$$

где G_1 , G_2 , $G_{см}$ – массовые расходы продуктов сгорания, эжектируемого воздуха и теплоносителя на выходе из теплогенератора; h_1 , h_2 , $h_{см}$ – удельные энтальпии продуктов сгорания, эжектируемого воздуха и теплоносителя на выходе из теплогенератора соответственно.

Считая смесеобразующие компоненты и их смесь идеальными газами, удельную энтальпию можно представить в виде $h = c_p(T - T_0)$, и баланс энтальпий будет

$$G_{см}c_{pсм}(T_{см} - T_0) = G_1c_{p1}(T_1 - T_0) + G_2c_{p2}(T_2 - T_0),$$

где $G_{см} = G_1 + G_2$, c_p – средняя изобарная теплоемкость компоненты.

Проведя несложные преобразования можно получить, что

$$T_{\text{см}} = \frac{G_1 c_{p1} T_1 + G_2 c_{p2} T_2}{G_1 c_{p1} + G_2 c_{p2}}.$$

В последнем уравнении предполагаются известными все температуры (причем $T_{\text{см}}$ – исходная величина для проектирования, а T_2 – средняя температура окружающего воздуха) и изобарные теплоемкости. Тогда расход эжектируемого воздуха обеспечивающего заданную температуру теплоносителя на выходе из теплогенератора будет

$$G_2 = \frac{G_1 c_{p1} (T_1 - T_{\text{см}})}{c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2)}.$$

Согласно открытию № 314 сделанному академиком В.Н. Челомеевым, О.И. Кудриным и А.В. Квасниковым в эжекционном процессе с пульсирующей активной струей наблюдается аномальный прирост тяги, порядка 140 %. В этой связи необходимо заметить, что при осредненном значении расхода G_1 на выходе из АПГ следует ожидать увеличение притока эжектируемого воздуха в 2,4 раза. Значит, в расчетное выражение для G_2 следует ввести коэффициент увеличения расхода k_p . Поскольку амплитудные отклонения скорости эжектирующей струи от средней на выходе из АПГ достаточно велики, можно принять для практических расчетов коэффициент увеличения расхода эжектируемого воздуха в диапазоне 1,7...2,4. В этом случае

$$G_2 = k_p \frac{G_1 c_{p1} (T_1 - T_{\text{см}})}{c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2)}.$$

В сумме расход продуктов сгорания и эжектируемого воздуха должны обеспечивать заданную объемную производительность теплогенератора

$$V_{\text{см}} = \frac{G_1 + G_2}{\rho_{\text{см}}} = \frac{1}{\rho_{\text{см}}} \left(G_1 + k_p \frac{G_1 c_{p1} (T_1 - T_{\text{см}})}{c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2)} \right).$$

Откуда

$$G_1 = \frac{V_{\text{см}} \rho_{\text{см}} c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2)}{c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2) + c_{p1} k_p (T_1 - T_{\text{см}})}. \quad (1)$$

В свою очередь, средний расход продуктов сгорания на выходе из аппарата пульсирующего горения определяется законом сохранения массы, т.е. $G_1 = G_{\text{в}} + G_{\text{г}}$, где $G_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха, необходимого для сжигания горючего в количестве $G_{\text{г}}$. С учетом того, что необходимый расход воздуха $G_{\text{в}}$ можно выразить через массовое соотношение количества подаваемого воздуха и горючего k_m , получим

$$G_1 = G_{\text{г}} k_m + G_{\text{г}} = G_{\text{г}} (k_m + 1).$$

Расход горючего $G_{\text{г}}$ однозначно определяется заданной тепловой мощностью АПГ

$$G_{\text{г}} = \frac{W}{W_{\text{н}}^{\text{п}} \eta_{\text{г}}},$$

где W – тепловая мощность, Вт; $W_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг; $\eta_{\text{г}}$ – КПД аппарата пульсирующего горения.

В конечном итоге расход продуктов сгорания G_1 можно выразить через исходные данные для расчета АПГ на заданную тепловую мощность

$$G_1 = \frac{W}{W_{\text{н}}^{\text{п}} \eta_{\text{г}}} (k_m + 1). \quad (2)$$

Комбинируя выражения (1) и (2), легко получить необходимую тепловую мощность аппарата пульсирующего горения, обеспечивающую объемный расход теплоносителя на выходе из теплогенератора $V_{\text{см}}$ и заданную температуру $T_{\text{см}}$:

$$W = \frac{G_1 W_H^p \eta_{\Gamma}}{(k_m + 1)}$$

или

$$W = \frac{V_{\text{см}} \rho_{\text{см}} c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2)}{c_{p2} (T_{\text{см}} - T_2) + c_{p1} k_p (T_1 - T_{\text{см}})} \frac{W_H^p \eta_{\Gamma}}{(k_m + 1)}. \quad (3)$$

В выражении (3) теплофизические свойства газа на выходе из АПГ с индексом "1", определяются в результате термодинамического расчета процесса горения при заданном массовом соотношении воздух/топливо k_m . Свойства окружающего воздуха с индексом "2" определяются средней температурой эксплуатации теплогенератора. Плотность смеси определяется как плотность воздуха при температуре смеси $T_{\text{см}}$.

Поскольку инженерная методика расчета аппаратов пульсирующего горения на заданную тепловую мощность достаточно полно разработана [1], остается определить геометрические размеры эжектора, обеспечивающие заданные параметры теплоносителя на выходе из теплогенератора. В этом вопросе можно ориентироваться, например, на методы проектирования газовых эжекционных смесителей, используемые при расчете газовых горелок [2]. Однако, при этом следует учитывать, что в литературе рассматриваются методики проектирования эжекторов со стационарной активной струей эжектирующего газа, поэтому при расчете массового и объемного коэффициентов эжекции следует принять коэффициент увеличения расхода за счет пульсирующей активной струи k_p равным 1.

Таким образом, алгоритм расчета эжекционного теплогенератора с АПГ реализуется по следующей схеме:

- 1) Определяется тепловая мощность АПГ, обеспечивающая заданную объемную производительность и температуру теплоносителя на выходе из теплогенератора по выражению (3).
- 2) Рассчитываются режимные и конструктивные параметры АПГ на полученную мощность.
- 3) Определяются размеры эжектирующего кожуха без учета увеличения расхода эжектируемого воздуха за счет активной пульсирующей струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Быченко В.И., Коптев А.А., Баранов А.А. Метод расчета устройств пульсирующего горения на заданную тепловую мощность // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 1998. Т. 4. № 1. С. 59 – 63.

2 Ионин А.А. Газоснабжение: Учебник. М.: Стройиздат, 1989.