

Аэродинамическая характеристика дымового тракта печного агрегата и ее использование для анализа мероприятий по совершенствованию тепловой работы печи

Разработана методика для построения аэродинамической характеристики дымового тракта печного агрегата, позволяющая учесть реальную величину теплотерь и присосы воздуха при движении продуктов сгорания по каналам дымового тракта, а также динамическую тепловую характеристику рекуператора. Представлена схема использования созданной методики для анализа возможности реализации конкретных мероприятий, нацеленных на совершенствование тепловой работы печи за счет замены или реконструкции рекуператоров.

Ключевые слова: нагревательная печь, рекуператор, дымовой тракт, аэродинамическая характеристика

Важным направлением современной металлургической теплотехники является поиск путей интенсификации теплообменных процессов в рекуператорах нагревательных и термических печей. Достижение этого результата дает возможность повысить значение коэффициентов рекуперации и использования топлива и, соответственно, приводит к сокращению расхода топлива [1].

В общем случае интенсификация теплоотдачи к газообразным средам или от них сопряжена с ростом гидродинамического сопротивления каналов теплообменника [2, 3]. Применительно к рекуператорам по воздушной стороне можно найти некоторые резервы повышения давления воздуха для его прокачивания через увеличенное гидродинамическое сопротивление. Что касается дымового канала, для которого, как правило, разрежение создается только при помощи дымовой трубы, резервы интенсификации теплоотдачи довольно сильно ограничены. При рассмотрении варианта установки дымососа возникает вопрос об экономической целесообразности этого мероприятия и о температурном режиме лопаток.

При решении вопросов, связанных с совершенствованием работы печей за счет замены рекуператоров или реконструкции существующих [4], необходимо оценивать влияние этого мероприятия на аэродинамическое сопротивление дымового тракта.

При правильной работе печного агрегата в каждый момент времени потери давления при прохождении конкретного расхода продуктов сгорания должны равняться разрежению, создаваемому дымовой трубой (или дымососом) [1]. При этом будет поддерживаться заданный уровень давления в рабочей камере печи. Идеальное значение избыточного давления на уровне рабочих окон (если таковые имеются) равно нулю. На практике значение этой величины поддерживают обычно на уровне нескольких паскаль для исключения подсосов холодного воздуха в печь. Если в какой-то момент времени происходит рассогласование между расходом продуктов сгорания, образующихся в печи (и соответственно потерями давления в дымовом тракте) и создаваемым разрежением, давление

на уровне рабочих окон уходит от заданного уровня. В процессе значительного повышения давления в печи наблюдается выбивание продуктов сгорания из печи, ухудшаются условия горения. При этом в продуктах сгорания возможно появление окиси углерода и других продуктов неполного горения, а при использовании жидкого топлива возможно выпадение пастообразных отложений. Падение давления в печи сопровождается подсосами холодного воздуха, что ведет к падению температуры в камере печи, росту парциального давления кислорода и, соответственно, усилению окисления металла.

В каждый момент времени при переменном расходе топлива заданный уровень давления в рабочей камере можно поддерживать за счет управления положением дымового шиберга. Положение этого регулирующего органа определяет его гидравлическое сопротивление и, следовательно, сопротивление всего дымового тракта, что дает возможность уравновесить суммарные потери давления в дымовом тракте с имеющимся разрежением.

Известна подробно разработанная методика расчета гидравлического сопротивления дымового тракта [5]. Ее можно использовать как для выбора устройства, создающего разрежение для преодоления конкретного сопротивления на стадии проектирования агрегата, так и для проверки возможности реконструкции без замены устройства, создающего разрежение. Такой расчет, как правило, выполняют для режима с максимальным расходом газообразных сред.

В общем случае потери давления складываются из потерь давления на трение, местных сопротивлений и геометрических потерь [5]:

– потери давления на трение определяют по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d_r} \cdot \frac{\rho_0 V_0^2}{2F^2} \cdot \frac{t + 273}{273},$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (в общем случае определяется в зависимости от критерия Re и показателей шероховатости поверхности

трения); L – длина участка трения, м; $d_f = 4F/P$ – гидравлический диаметр канала, м (F – сечение канала, м²; P – смачиваемый периметр канала, м); ρ_0 – плотность движущейся среды (н. ф. у.), кг/м³; V_0 – расход движущейся среды (н. ф. у.), м³/с; t – температура движущейся среды, °С;

– потери давления на местном сопротивлении вычисляются из выражения

$$\Delta P_{mc} = k_{mc} \frac{\rho_0 V_0^2}{2F^2} \cdot \frac{t_f + 273}{273},$$

где k_{mc} – коэффициент местного сопротивления;

– геометрические потери давления можно определить из следующей зависимости:

$$\Delta P_r = \pm hg(\rho_{cp} - \rho),$$

где ρ – плотность продуктов сгорания в исследуемом элементе дымохода (д. ф. у.), кг/м³; h – высота участка подъема или спуска, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_{cp} – плотность среды, окружающей канал, кг/м³ (знак «+» или «-» выбирают в зависимости от направления движения продуктов сгорания в вертикальном направлении).

Для сложных гидродинамических систем, где происходят различные потери давления, значение давления, с помощью которого будет обеспечено прокачивание заданного расхода теплоносителя, определяют из следующего уравнения [5]:

$$P \geq \sum_{i=1}^n P_{tpi} + k_{vb} \cdot \sum_{j=1}^m P_{mcj} + \sum_{k=1}^l P_{rk},$$

где m, n, l – числа участков трения, местного сопротивления и гидростатических потерь соответственно; k_{vb} – коэффициент взаимного влияния местных сопротивлений, зависит от гидравлической схемы дымового тракта (для предварительных расчетов его можно принять на уровне 1,1-1,2).

Падение температуры продуктов сгорания по длине борова обычно задают в виде усредненного удельного падения температуры (°С/м). При этом достаточно сложно учесть особенности охлаждения газов в конкретном канале (материал стенок борова, толщина стенок, наружное или подземное положение канала, температура окружающей среды). Точный расчет падения температуры в данной работе можно выразить зависимостью

$$t_2 = t_1 - \frac{qL}{V_0 c},$$

где t_1, t_2 – температура в начале и конце рассматриваемого элемента дымохода соответственно, °С; V_0 – объемный расход продуктов сгорания (н. ф. у.), м³/с; c – теплоемкость продуктов сгорания в диапазоне температур нахождения в канале, Дж/(м³·К); L – длина рассматриваемого канала, м; q – удельные теплоты, Вт/м.

Удельные теплоты определяют по формуле

$$q = \frac{t_1 - t_{o.c.}}{R_{\Sigma}},$$

где $t_{o.c.}$ – температура окружающей среды, °С; R_{Σ} – сумма термических сопротивлений на пути рас-

пространения тепла от продуктов сгорания в окружающую среду, (м·К)/Вт.

Набор последовательно включенных термических сопротивлений зависит от того, имеет ли конкретный элемент дымового тракта подземное или надземное расположение. В любом случае первое сопротивление представляет собой сопротивление лучистой и конвективной теплоотдаче к внутренней поверхности стенки канала, второе – сопротивление теплопроводности стенки канала. Далее, в случае надземной прокладки, третье сопротивление соответствует отдаче тепла в окружающую среду от наружной поверхности канала.

Для определения сопротивления стенок канала используют следующую зависимость:

$$R_{ct} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ct}} \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_b}\right),$$

где d_n, d_b – наружный и внутренний эквивалентные диаметры рассматриваемого элемента дымохода, м; λ_{ct} – коэффициент теплопроводности материала стенок рассматриваемого элемента дымохода, Вт/(м·К).

Сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности канала дымохода в окружающую среду при надземной прокладке определяют как

$$R_n = \frac{1}{\pi d_n \alpha_n},$$

где α_n – итоговый коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности канала в окружающую среду, Вт/(м²·К).

Для случая подземного расположения элемента дымохода в качестве одного из последовательно включенных сопротивлений выступает сопротивление грунта, которое вычисляют по формуле Форхгеймера

$$R_{rp} = \frac{1}{2\pi\lambda_{rp}} \cdot \ln\left(2\frac{h}{d_n} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_n^2} - 1}\right),$$

где λ_{rp} – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К); h – глубина расположения продольной оси элемента дымохода, м.

В случае, когда отношение $h/d_n > 2$, используют упрощенную формулу

$$R_{rp} = \frac{\ln(4h/d_n)}{2\pi\lambda_{rp}}.$$

При малой глубине закладки подземного канала ($h/d_n < 2$) температура поверхности грунта над ним может существенно отличаться от естественной температуры поверхности грунта. В этом случае расчет теплоты производят по температуре наружного воздуха и приведенной глубине закладки (h_n), которая отличается от действительной (h_d) добавкой толщины фиктивного слоя грунта (h_{ϕ}): ($h_n = h_d + h_{\phi}$), сопротивление которого численно равно сопротивлению теплопередачи от поверхности грунта к воздуху:

$$h_{\phi} = \lambda_{rp} / \alpha_{rp},$$

где α_{rp} – коэффициент теплоотдачи на поверхности грунта, Вт/(м²·К).

На основании вышеизложенного создана программа для автоматизированного расчета потерь давления для произвольных исходных данных. Одним из важных направлений ее использования является анализ проектов по созданию или реконструкции рекуператоров теплотехнических агрегатов. При этом для рекуператора предусмотрен не только расчет потерь давления продуктов сгорания в нем, но и учет его динамической тепловой характеристики [4], которая оказывает влияние на температуру продуктов сгорания перед дымовой трубой и создаваемое ею разрежение. То есть, речь идет о создании комплексного теплогидравлического расчета дымового тракта, учитывающего динамическую тепловую характеристику рекуператора.

В основу разработанной программы положены универсальные модули для расчета потерь давления на типовых сопротивлениях: участок трения, местное сопротивление, геометрическое сопротивление. Каждый модуль имеет возможность взаимосвязи с предыдущими и последующими модулями. Для участков трения можно задать произвольную величину подсосов воздуха, учитывающую реальное состояние элемента дымохода, и расчет падения температуры за счет потерь тепла теплопередачей через стенки канала дымохода в окружающую среду. По окончании расчета каждый модуль передает последующему данные о количестве продуктов сгорания (которое в общем случае может изменяться из-за присосов воздуха); а также о температуре продуктов сгорания (которая меняется за счет охлаждения в рассматриваемом элементе дымохода и подсоса холодного воздуха).

Известно, что при проектировании дымовых труб или выборе дымоходов для конкретных теплотехнологических агрегатов закладывают некоторый запас по разрежению. На практике иногда появляется возможность, используя этот запас, повысить коэффициент рекуперации за счет увеличения поверхности теплообмена или смены конструкции рекуператора. Поэтому для расширения возможностей анализа предложено ввести понятие аэродинамической характеристики дымового тракта, которая представляет собой зависимость разрежения, создаваемого дымовой трубой, и положения дымового шиберов, при котором уравниваются потери давления и тяга, от расхода топлива (и соответственно продуктов сгорания). На основании аэродинамической характеристики можно изучать работу печного агрегата при изменениях расходов газообразных сред, а также «примерять» возможность замены рекуператора или увеличения поверхности существующего без замены тяго-дутьевых устройств.

Инструментом для построения аэродинамической характеристики дымового тракта печного агрегата являются созданные в данной работе методика и программа для комплексного теплогидравлического расчета дымового тракта.

На рис. 2 показан пример аэродинамической характеристики дымового тракта. Для построения использованы типовые данные о геометрии дымохода нагревательной печи средней мощности (12 МВт),

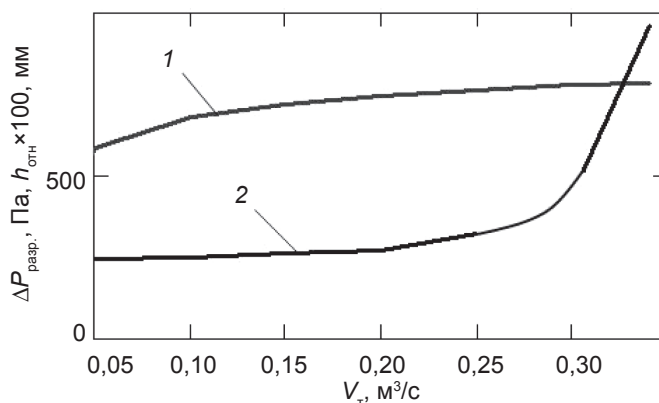


Рис. Аэродинамическая характеристика дымового тракта: 1 – изменение разрежения, создаваемого дымовой трубой от расхода топлива; 2 – изменение относительной высоты подъема шиберов от расхода топлива

снабженной керамическим рекуператором площадью 800 м². В качестве топлива рассмотрен природный газ с удельным выходом продуктов сгорания 12 м³/м³, высота дымовой трубы – 100 м.

Анализ аэродинамической характеристики дымового тракта дает возможность для имеющейся схемы дымового тракта и характеристик установленного рекуператора выявить возможные пределы форсирования тепловой работы агрегата (пределным является расход топлива, при котором шибер полностью поднят). Построение аэродинамической характеристики дымового тракта для случая «примерки» другого рекуператора производят с учетом параметров нового теплообменника. На ее основе устанавливают допустимый диапазон тепловой мощности агрегата (таковым является диапазон от минимального расхода топлива до такого значения, при котором заслонка полностью поднята) при работе с «примеряемым» рекуператором.

Для функционирующего агрегата при текущих параметрах нагрева сопоставление положения дымового шиберов, определенного при помощи аэродинамической характеристики, с положением этого органа, автоматически устанавливаемым АСУ ТП для поддержания заданного давления в камере печи, дает возможность проверить точность гидравлического расчета дымового тракта и в случае необходимости внести коррективы.

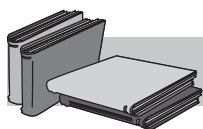
Выводы

1. Разработана методика для построения аэродинамической характеристики дымового тракта печного агрегата, позволяющая учесть реальную величину теплотерь и присосы воздуха при движении продуктов сгорания по каналам дымового тракта, а также динамическую тепловую характеристику рекуператора.

2. Отработана схема использования созданной методики для анализа возможности реализации конкретных мероприятий, нацеленных на совершенствование тепловой работы печи за счет замены или реконструкции рекуператоров путем расчетной «примерки» новых параметров рекуператора в дымоход и определения положения дымового шиберов для различных значений тепловой нагрузки агрегата.

3. Анализ рассогласования расчетных положений шибера согласно аэродинамической характеристике дымового тракта с устанавливаемыми автоматически

при помощи системы АСУ ТП дает представление об изменении сопротивления дымового тракта в случае забивания рекуператора или зарастания дымохода.



ЛИТЕРАТУРА

1. Губинский В. И. *Металлургические печи: учебн. пособие.* – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
2. Калафати Д. Д., Попалов В. В. *Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена.* – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 151 с.
3. Тебеньков Б. П. *Рекуператоры промышленных печей.* – М.: Metallurgiya, 1975. – 294 с.
4. Бiryukov A. B., Kравцов В. В., Косолюкин Д. А. *Анализ мероприятий по повышению эффективности тепловой работы рекуператоров нагревательных печей // Металл и литье Украины.* – 2011. – № 7. – С. 11-15.
5. Курбатов Ю. Л., Шелудченко В. И., Кравцов В. В. *Механика жидкости и газа: учеб. пособие.* – Севастополь: Вебер, 2003. – 226 с.

Анотація

Бiryukov O. B.

Аеродинамічна характеристика димового тракту пічного агрегату та її використання для аналізу заходів з удосконалення теплової роботи печі

Розроблено методику для побудови аеродинамічної характеристики димового тракту пічного агрегату, що дозволяє врахувати реальну величину тепловитрат і присоси повітря в процесі руху продуктів згоряння по каналам димового тракту, а також динамічну теплову характеристику рекуператора. Представлено схему використання створеної методики для аналізу можливості реалізації конкретних заходів, що націлені на удосконалення теплової роботи печей за рахунок заміни або реконструкції рекуператорів.

Ключові слова

нагрівальна піч, рекуператор, димовий тракт, аеродинамічна характеристика

Summary

Biryukov A. B.

Furnace aggregate waste gases path aerodynamic characteristic and its use for furnace heat work improvement ways analysis

Method for furnace aggregate waste gases path aerodynamic characteristic building that allows to consider heat losses and air sucking real value on waste gases motion in path channel and recuperator dynamic heat characteristic is created. Scheme of created method use for concrete ways of furnaces heat work improvement realization probability analysis due to recuperators replacement or reconstruction is proposed

Keywords

heating furnace, recuperator, waste gases path, aerodynamic characteristic

Поступила 11.07.13