



*The analysis of calculation methods of efficiency of the fuel burning in open gas furnaces is given. The norms of consumption of certain types of energy for output of products volume are determined.*

И. А. ТРУСОВА, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, С. В. КОРНЕЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 669.041

## АНАЛИЗ И ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ

По мере развития методов анализа энергопотребления (в частности, сжигания топлива) в различных отраслях промышленности и энергетики соответственно формировались необходимые определения и термины в энергосбережении. Причем единой терминологии здесь не было, так как разработкой методов анализа энергопотребления занимаются многие организации и специалисты как в Беларуси и России, так и за рубежом [1].

В направлении развития методов комплексного анализа затрат топлива и энергии за последние три-четыре десятилетия выполнено огромное количество работ. Для черной металлургии и машиностроения можно выделить основные направления поиска путей перехода от нормирования расхода к комплексному анализу затрат топлива и энергии.

Основные исследования были направлены на создание методов разработки и анализа топливно-энергетического баланса как для условий отдельно взятого предприятия, так и для отрасли в целом. Следует отметить, что данные балансы составляются по результатам анализа многочисленных частных балансов (как энергетических, так и материальных). Цель их составления – определение нормы расхода отдельных видов энергии на объем производства продукции. Недостатки такого подхода общеизвестны.

С целью их преодоления начал получать развитие метод межотраслевого баланса с соответствующими матричными моделями и математическим аппаратом. Межотраслевой баланс производства и распределения важнейших продуктов в натуральном выражении должен представлять собой систему взаимосвязанных материальных балансов, характеризующих межотраслевые связи и внутриотраслевые пропорции. При расчете внутриотраслевых пропорций в энергопотреблении черной металлургии и машиностроения используются коэф-

фициенты прямых затрат, которые отличаются от норм расхода тем, что в них, помимо чисто технологических затрат, включаются затраты общецеховые, общезаводские и даже общепромышленные, вследствие чего эти коэффициенты оказываются больше, чем общепринятые нормы расхода, что противоречит современным требованиям. Также следует отметить, что прямые затраты не дают представления о затратах энергоносителей в конкретной отрасли промышленности и не учитывают эффекта влияния структуры отдельных производств на энергетические затраты.

В начале 60-х годов поиск соотношений между внутриотраслевыми и межотраслевыми пропорциями было предложено вести с помощью коэффициентов полных затрат. Эти коэффициенты выражают последовательное наложение прямых и косвенных затрат материалов и энергии на производство тех или иных видов продукции. В качественном отношении коэффициенты полных затрат отличаются от коэффициентов прямых затрат тем, что являются более представительными. Близкими по содержанию к этим коэффициентам были обобщенные энергозатраты. Помимо полных затрат, предлагались также так называемые комплексные затраты. Они призваны учитывать прямые и косвенные взаимосвязи в пределах комплекса подотраслей – продуктов. Комплексные затраты, отнесенные к единице продукции и за вычетом возможных вторичных энергетических ресурсов, определялись как энергоемкость этой продукции. Однако данный метод так и не был освоен ни на предприятиях, ни в проектных и других организациях черной металлургии и машиностроения в силу своей громоздкости.

В настоящее время в практике инженерных теплотехнических расчетов используются обычно два пути [2] обработки данных: общепринятая

нормативная методика (1973 г.) и упрощенная методика, разработанная М. Б. Равичем (1971 г.).

Общепринятая методика требует выполнения большого объема трудоемких анализов и измерений: определение состава топлива и его теплоты сгорания, отбор средних проб топлива и т. д.

Методика М. Б. Равича позволяет определять потери теплоты в установке и подсчитывать коэффициент полезного действия (КПД) для известного вида топлива только по данным состава и температуры продуктов горения. При этом нет необходимости в определении полного состава топлива и его количества.

Так, например, для нагревательных печей кузнечно-штамповочного производства наиболее важными безразмерными теплотехническими характеристиками эффективного использования ТЭР являются [3] коэффициент использования топлива и общий коэффициент полезного действия.

При оценке экологических последствий использования топлива необходимо учитывать как объемную концентрацию токсичных веществ, так и их суммарный выброс из топливосжигающего агрегата. Наиболее представительными характеристиками оценки энергоэкологического совершенства такого агрегата являются [4]:

1) удельный выход токсичных веществ, отнесенный к единице полезно воспринятой теплоты  $C_{t,i}'' = c_{t,i} \cdot (1 + \alpha L_{st}) / (Q_H^p \eta_{и.т.т.})$ , где  $c_{t,i}$  – концентрация вредных веществ (например, оксидов азота);  $\alpha$  – коэффициент избытка окислителя (например, воздуха);  $L_{st}$  – объемное стехиометрическое отношение окислитель–горючее;

2) относительная энергетическая эффективность способа отопления в высокотемпературной установке (сводовое, торцовое и т. д.)

Начиная [1] с 80-х годов Уральским государственным техническим университетом и Урал-энергочерметом в сотрудничестве с рядом организаций разрабатывались методы полного (сквозного) энергетического анализа (ПЭА) производств и технологических процессов. При этом следует отметить, что, по мнению многих ученых и производственников, полная (сквозная) энергоемкость производимой продукции является наиболее представительным и глобальным показателем энергетической эффективности (данный показатель нашел свое отображение в стандарте [5] 2000 г., который нормативно установил ряд основных понятий, принципов в области энергосбережения). В результате проведенной работы была создана методология [6] интегрального энергетического анализа (ИЭА), базовым понятием которой является

технологическое топливное число (ТТЧ). Данная величина охарактеризована как полная сумма всех сквозных энергетических затрат на производство единицы продукции за вычетом энергоемкости используемых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и побочных продуктов.

Однако ни одна из перечисленных выше методик расчета потребления энергетических ресурсов (сжигания топлива) в высокотемпературных установках в достаточной мере не учитывает их конструктивные и технологические параметры, влияющие на эффективность использования ТЭР. А сравнительное комплексное исследование [7] способов отопления (методов сжигания) в высокотемпературных установках в применении к черной металлургии и машиностроению показало, что каждый способ имеет свою область эффективного применения в зависимости от конструкции и особенностей работы печей.

Наибольший интерес представляет путь оптимизации коэффициента использования теплоты топлива через технологические и конструктивные параметры.

Коэффициент использования топлива определяется как:

$$\eta_{и.т.т.} = \frac{Q_{х.топл} + Q_{физ}^B - Q_{ух} - Q_{недож}}{Q_{х.топл}}, \quad (1)$$

где  $Q_{х.топл}$  – теплота от сгорания топлива (химическая теплота топлива), МВт или МДж/ч;  $Q_{физ}^B$  – теплота, вносимая с подогретым воздухом, МВт или МДж/ч;  $Q_{ух}$  – теплота, уносимая дымовыми газами на выходе из рабочего пространства печи, МВт или МДж/ч;  $Q_{недож}$  – потери теплоты от механического недожога топлива, МВт или МДж/ч.

Общий коэффициент полезного действия определяется как:

$$\eta_{общ} = \frac{Q_{усв.топл}}{Q_{х.топл}} = \frac{Q_{мет} - (Q_{экз} - Q_{ок})}{Q_{х.топл}}, \quad (2)$$

где  $Q_{усв.топл}$  – теплота, усвоенная металлом от сжигания топлива, МВт или МДж/ч;  $Q_{мет}$  – теплота, затраченная на нагрев металла, МВт или МДж/ч;  $Q_{экз}$  – теплота, выделившаяся при окислении металла (теплота экзотермических реакций), МВт или МДж/ч;  $Q_{ок}$  – тепловые потери с окалиной, МВт или МДж/ч.

Уравнение теплового баланса газопламенной печи:

$$Q_{х.топл} + Q_{физ}^B + Q_{экз} = Q_{мет} + Q_{ух} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл.ср} + Q_{ок} + Q_{недож} + Q_{тр} + Q_{подс}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{кл}}$  – тепловые потери через кладку, МВт или МДж/ч;  $Q_{\text{изл}}$  – тепловые потери через открытые окна и проемы, МВт или МДж/ч;  $Q_{\text{охл.ср}}$  – тепловые потери с охлаждающей средой, МВт или МДж/ч;  $Q_{\text{тр}}$  – тепловые потери, связанные с нагревом перемещающихся частей печи и транспортирующих устройств, МВт или МДж/ч;  $Q_{\text{подс}}$  – тепловые потери, связанные с подсосами холодного воздуха в рабочую камеру, МВт или МДж/ч.

Выражение (1) можно преобразовать с учетом (2) и (3):

$$\eta_{\text{и.т.т.}} = \eta_{\text{общ}} + \frac{Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл.ср}} + Q_{\text{тр}}}{Q_{\text{х.топл}}}. \quad (4)$$

В пределе абсолютное значение общего коэффициента полезного действия печи стремится к абсолютному значению коэффициента использования теплоты топлива:

$$\lim_{\sum Q_{\text{пот}} \rightarrow 0} \eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{и.т.т.}} \quad (5)$$

Исходя из этого, коэффициент использования теплоты топлива выступает в качестве теоретически максимально допустимого общего коэффициента полезного действия.

Так, например, в работе [8] приведен тепловой баланс одной из действующих нагревательных проходных печей при различных режимах ее работы. Для данной печи перечисленные выше коэффициенты имеют диапазон соотношений 0,45–0,55. Это свидетельствует о том, что эффективность сжигания топлива в данной печи потенциально составляет около 50% от теоретически возможного.

Значительное увеличение коэффициента использования топлива, согласно выражениям (1) и (4), возможно за счет оптимизации следующих конструктивных параметров печи.

1. Выбор для конкретной печи оптимального соотношения между величинами  $Q_{\text{физ}}^{\text{в}}$ ,  $Q_{\text{ух}}$  [9].
2. Выбор энергоэффективной футеровки с целью снижения величины  $Q_{\text{кл}}$  [10].
3. Организация механической загрузки-выгрузки заготовок и работы печи при закрытых окнах загрузки-выгрузки [11].

Дальнейшее увеличение коэффициента использования топлива (4) возможно за счет оптимизации технологических параметров нагрева заготовок в выражении (2)

$$Q_{\text{мет}}, Q_{\text{экз}}, Q_{\text{ок}} \sim G \sim i, \quad (5)$$

где  $G$  – производительность печи;  $i$  – энтальпия нагретого металла.

Для системы из  $n$  заготовок выражение для энтальпии можно записать в следующем виде:

$$i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{V_j} \int c(V)T(V)dV, \quad (6)$$

где  $c(V), T(V)$  – зависимости удельной теплоемкости и абсолютной температуры от объемной координаты в  $j$ -й заготовке.

Для выражения (6) справедливо выражение:

$$cT_{\text{min}} \leq i \leq cT_{\text{max}}. \quad (7)$$

Функцию перепада температуры по сечению для  $j$ -й заготовки можно представить в виде

$$(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})_j = f_j(h_B, x_B, x_S, P), \quad (8)$$

где  $h_B$  – высота установки боковых горелок;  $x_S$  – характерный размер щели подины;  $x_B$  – расстояние между центрами заготовок;  $P$  – мощность горелок.

Таким образом, оптимальное решение для каждой  $j$ -й заготовки выражения (8) будет находиться при  $T_{\text{min}} \rightarrow T_{\text{max}}$ , что говорит о равномерности нагрева заготовок.

В работе [12] представлена математическая модель для решения выражений (8) и указаны дополнительные ограничения для определенных марок сталей на скорость их нагрева.

Таким образом, при проведении многовариантных расчетов подбора конструктивных и технологических параметров газопламенных печей имеется возможность (графически или аналитически) составить универсальную зависимость вида  $\eta_{\text{и.т.т.}} = g(f_j(h_B, x_B, x_S, P))$ , которая будет определять технологию качества нагрева заготовок, удельный расход и характер экологических последствий использования топлива, а также общий коэффициент полезного действия.

## Литература

1. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Хрестоматия энергосбережения. Кн. 1. М.: Теплоэнергетик, 2003.
2. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справ. изд. Т. 1. М.: Теплотехник, 2004.
3. Типовое положение по расчету теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного и термического производства ПО «МАЗ». БНТУ, 2008.
4. Сорока Б. С., Валь Л. И. Комплексная энергоэкологическая оценка эффективности топливоиспользования в печах для нагрева металла // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 2. С. 32–35.

5. ГОСТ РФ № 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения.
6. Проблемы стандартизации показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов / В. Г. Лисинко, Я. М. Щелоков, С. Е. Розин, М. Г. Ладыгичев, О. Г. Дружинина // Сталь. 2004. № 4. С. 101–104.
7. Денисов М. А., Михалев Г. А. Выбор схем отопления нагревательных печей // Сталь. 2005. № 6. С. 92–94.
8. Менделев Д. В. Теплотехнические исследования нагревательных толкательных печей проходного типа с целью определения и улучшения их основных энерготехнологических показателей // Литье и металлургия. 2008. № 4. С. 47–51.
9. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Менделев Д. В., Герман М. Л. Теплотехническое и экономическое обоснование выбора оптимальной температуры нагрева воздуха в рекуператорах нагревательных проходных печей машиностроительных предприятий // Изв. вузов и высш. энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2009, № 3. С. 50–59.
10. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Менделев Д. В., Несенчук А. П., Герман М. Л. Теплотехническое обоснование выбора энергоэффективной футеровки нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий // Изв. вузов и высш. энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2009. № 4. С. 48–55.
11. Пат. РБ № U5157. Конструкция проходной печи газовой. / Герман М. Л., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Менделев Д. В. и др.
12. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Менделев Д. В., Ратников П. Э., Корнеев С. В. Подбор конструктивных и технических параметров проходной нагревательной печи для нагрева заготовок под штамповку с целью создания энергосберегающих технологий // Республ. Межвед. сб. науч. тр. «Металлургия». 2009. Вып. № 32. С. 30–40.