

Повышение эффективности энергосбережения при работе нагревательных печей термических цехов

Парамонов А. М., доктор техн. наук

Омский государственный технический университет

Резанов Е. М., канд техн. наук

Омский государственный университет путей сообщения

Рассмотрены пути повышения эффективности работы печей с радиационными трубами. Предложена методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в печах с радиационными трубами. Разработан алгоритм ее определения исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуператор и топливо. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма для определения экономически наиболее выгодной температуры подогрева воздуха в рекуператоре, идущего на горение топлива, при проектировании и эксплуатации нагревательных печей с радиационными трубами. Использование данных разработок позволяет повысить тепловую эффективность и экономичность их работы.

Ключевые слова: нагревательная печь, радиационная труба, энергосбережение, удельный расход топлива, эффективность, оптимизация.

В промышленности для термообработки изделий широко применяются нагревательные печи с радиационными трубами, внутри которых сжигается топливо, благодаря чему исключается контакт продуктов сгорания с нагреваемой поверхностью металла. Это позволяет значительно уменьшить потери металла от окисления и обезуглероживания, повысить эффективность и качество термообработки изделий.

По сравнению с термическими печами, где для нагрева и тепловой обработки изделий используют электрический обогрев, печи с радиационными трубами менее затратны и более выгодны вследствие прямого использования первичного топлива. Применение таких печей обусловлено их универсальностью (приемлемы для термической и химико-термической обработки металла).

В термических цехах потребление топлива в нагревательных печах с радиационными трубами характеризуется низким коэффициентом теплоиспользования. Это объясняется прежде всего низким техническим уровнем печей. Тепловые потери с уходящими газами составляют от 40 до 70 % общего расхода теплоты на печь, что обуславливает высокие удельные расходы топлива на нагрев и термообработку металла. Поэтому представляет актуальной проблема энергосбережения.

Эффективность использования топлива в термических печах с радиационными трубами повышается, если сочетаются мероприятия по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с возможно более полной утилизацией теплоты уходящих газов. Утилизация физической теплоты уходя-

щих газов для подогрева воздуха — основное мероприятие по энергосбережению, позволяющее повысить термический КПД печей, снизить удельный расход топлива на тепловую обработку металла за счет возвращения теплоты уходящих газов с подогретым воздухом в радиационные трубы термических печей. С повышением температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива в радиационной трубе печи, увеличивается поверхность нагрева рекуператора, а следовательно, растут затраты на теплоутилизирующее устройство. Поэтому целесообразно получить оправданную (оптимальную) температуру подогрева воздуха.

Анализ работы термической печи показывает, что из всех эксплуатационных расходов переменными величинами, зависящими от температуры воздуха, подаваемого для горения топлива, являются затраты на топливо, подачу дутьевого воздуха и отвод дымовых газов за пределы печного агрегата. Отчисления на реновацию, капитальный и текущий ремонт принимаются пропорциональными капиталовложениям.

В [1] предложена методика технико-экономической оптимизации утилизации в рекуператоре теплоты уходящих газов термических печей с радиационными трубами. В качестве критерия оптимальности принята оценка сравнительной эффективности инвестиций по минимуму дисконтированных затрат:

$$Z = C + P_n K, \quad (1)$$

где C — изменяющиеся годовые эксплуатационные расходы; P_n — норма дисконта инве-

стиций; K — единовременные капитальные вложения.

Данный критерий достаточно полно отвечает решению задачи технико-экономической оптимизации работы термических печей с радиационными трубами с учетом капитальных вложений и эксплуатационных расходов.

Для оптимизации утилизации теплоты продуктов сгорания топлива, уходящих из радиационных труб термической печи, разработана математическая модель тепловой работы радиационной трубы. Она основана на уравнениях теплообмена и баланса теплоты для печи и радиационной трубы при следующих допущениях: процессы горения и теплообмена стационарны; горение топлива гидродинамически стабилизировано по длине радиационной трубы; плотность теплового потока на поверхности стенки радиационной трубы постоянна; производительность печи задана и постоянна; нагрев металла осуществляется при постоянной температуре.

Условия однозначности: геометрические условия (определяются диаметральными и осевыми размерами); физические условия — физические свойства (вязкость, плотность, теплоемкость, теплопроводность); начальные условия — определяется температура стенки радиационной трубы; граничные условия третьего рода для рабочего пространства печи.

Разработанная математическая модель позволяет определять тепловые потоки в рабочем пространстве печи и в радиационной трубе в зависимости от температуры подогрева воздуха, идущего для горения топлива.

Значение оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре $t''_{в.опт}$ для конкретной температуры уходящих газов t_t на выходе из радиационной трубы термической печи можно найти исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат Z на рекуператор и топливо. Представим расход топлива B на нагрев металла обрабатываемых изделий и поверхность нагрева рекуператора H_p из уравнений теплового баланса рабочего пространства термической печи и теплообмена для рекуператора как функции температуры воздуха, подаваемого для горения топлива: $B = f(t''_в)$, $H_p = f(t''_в)$. Приравняв нулю первые производные функции выражения (1) по оптимизируемому параметру, получим расчетное уравнение для определения оптимальной температуры подогрева воздуха:

$$\frac{dZ}{dt''_в} = C_T \frac{dB}{dt''_в} + C_p \frac{dH_p}{dt''_в} = 0, \quad (2)$$

где $t''_в$ — температура воздуха на выходе из рекуператора; C_T — годовая стоимость топлива;

C_p — годовая стоимость 1 м^2 поверхности нагрева рекуператора.

Преобразования уравнения (2) позволили получить решение в виде:

$$at''_в^2 + bt''_в + d = 0; \quad (3)$$

$$t''_{в.опт} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ad}}{2a}, \quad (4)$$

где a , b , d — комплексы величин, учитывающие теплотехнические, теплофизические, эксплуатационные и стоимостные характеристики режимных параметров тепловой работы радиационных труб и термической печи [2].

На основе полученных выражений разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева в рекуператоре воздуха, идущего для горения топлива в радиационных трубах термических печей. При увеличении температуры подогрева воздуха повышается температура продуктов горения и стенки трубы, что может привести к превышению максимально допустимой температуры для данного типа материала. Для жаростойких радиационных труб, выполненных из легированных сталей, допустимая температура стенки составляет $1323 \div 1423 \text{ К}$, для карбидокремниевых труб — $1523 \div 1623 \text{ К}$. Поэтому при определении оптимальной температуры подогрева воздуха с целью обеспечения надежной работы радиационной трубы и предупреждения преждевременного выхода ее из строя введено ограничение

$$T_{ст}^{max} \leq T_{ст}^{доп}, \quad (5)$$

где $T_{ст}^{доп}$ и $T_{ст}^{max}$ — допустимая и максимальная температуры стенки радиационной трубы.

На основе уравнений теплообмена и баланса теплоты для печи и радиационной трубы получено выражение для определения максимальной температуры стенки радиационной трубы в зоне ядра факела горения топлива [3]:

$$T_{ст}^{max^4} a_1 + T_{ст}^{max} a_2 - a_3 = 0, \quad (6)$$

где

$$a_1 = \frac{C_0 \varepsilon_{пр} \varepsilon_T F_T^p + c_{пр} \Psi_{Т.М} F_T^p}{100^4}; \quad (7)$$

$$a_2 = \alpha_K F_T^p; \quad (8)$$

$$a_3 = C_0 \varepsilon_{пр} \varepsilon_T F_T^p \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 + a_2 T_K + c_{пр} \Psi_{Т.М} F_T^p \left(\frac{T_M}{100} \right)^4; \quad (9)$$

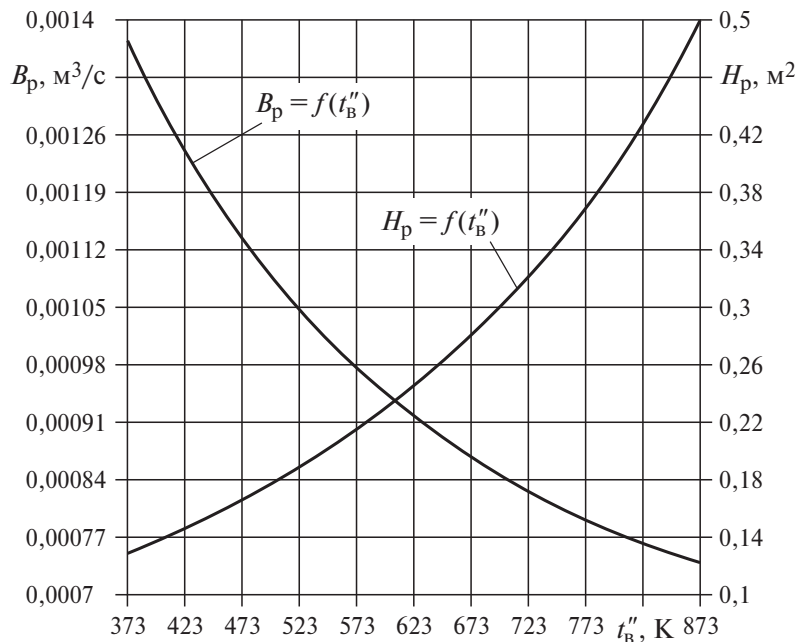


Рис. 1. Зависимости расхода топлива и поверхности нагрева рекуператора от температуры подогрева воздуха

C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты стенки; $\varepsilon_{\text{г}}$ — степень черноты излучаемого газа; $F_{\text{г}}^{\text{р}}$ — излучаемая поверхность радиационной трубы; $c_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения системы; $\Psi_{\text{т.м}}$ — общий угловой коэффициент от радиационной трубы на металл; $\alpha_{\text{к}}$ — средний коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к поверхности радиационной трубы; $T_{\text{к}}$ — калориметрическая температура горения топлива; $T_{\text{м}}$ — средняя температура нагреваемого металла.

Методика и алгоритм, предложенные для оптимизации тепловой работы радиационных труб термических печей и реализованные на ЭВМ, дали положительные результаты. Они относительно просты, не требуют большой подготовки и позволяют провести широкий круг исследований. Установлено, что одновременно выполняются необходимые и достаточные условия существования экстремума функции. Полученные значения $t''_{\text{в.опт}}$ отвечают минимуму целевой функции.

Исследования влияния основных факторов на оптимальную температуру подогрева воздуха в рекуператоре показали: с повышением температуры уходящих газов из радиационной трубы увеличиваются оптимальная температура подогрева воздуха, температура уходящих газов на выходе из рекуператора и температура стенки радиационной трубы; увеличение стоимости топлива и времени работы термической печи приводит к повышению оптимальной температуры подогрева воздуха и температуры стенки радиационной трубы;

увеличение стоимости рекуператора и низшей теплоты сгорания рабочей массы топлива вызывает снижение оптимальной температуры подогрева воздуха, температуры стенки радиационной трубы и повышение температуры уходящих газов на выходе из рекуператора.

Исследование влияния температуры подогрева воздуха на тепловой режим и технико-экономические показатели работы печи свидетельствуют, что с повышением температуры подогрева воздуха $t''_{\text{в}}$ происходит следующее: снижаются расход топлива в радиационной трубе на нагрев металла $B_{\text{р}}$ (рис. 1) и время нагрева металла в печи τ (рис. 2); увеличиваются поверхность нагрева рекуператора для радиационной трубы $H_{\text{р}}$ (рис. 1), термический КПД печи η (рис. 2), тепловой поток, переданный от одного тела к другому при теплообмене в системе “радиационная труба — кладка — изделие” $Q_{\text{тр}}$ и максимальная температура стенки радиационной трубы (рис. 3).

Для обоснования приемлемости разработанных методики, алгоритма и подтверждения достоверности полученных зависимостей выполнен сравнительный анализ работы установленной на одном из предприятий Омска термической печи с радиационными трубами при оптимальных параметрах и параметрах, отличающихся от оптимальных. Получены следующие результаты: КПД термической печи с оптимальными параметрами $\eta = 28,3 \%$, оптимальная температура подогрева воздуха $t''_{\text{в.опт}} = 701 \text{ К}$, а в существующей печи $\eta = 16,8 \%$, $t''_{\text{в}} = 373 \text{ К}$. При этом удель-

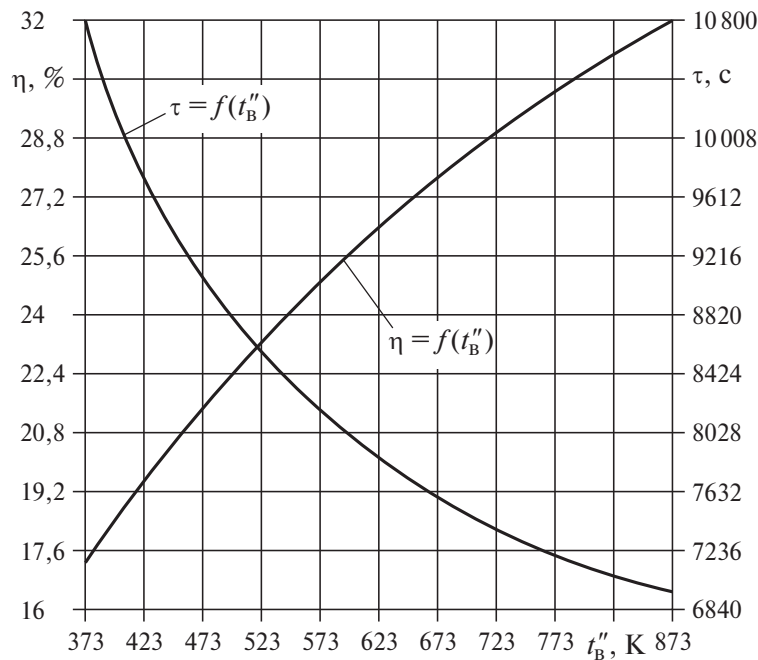


Рис. 2. Зависимости термического КПД печи и времени нагрева металла в печи от температуры подогрева воздуха

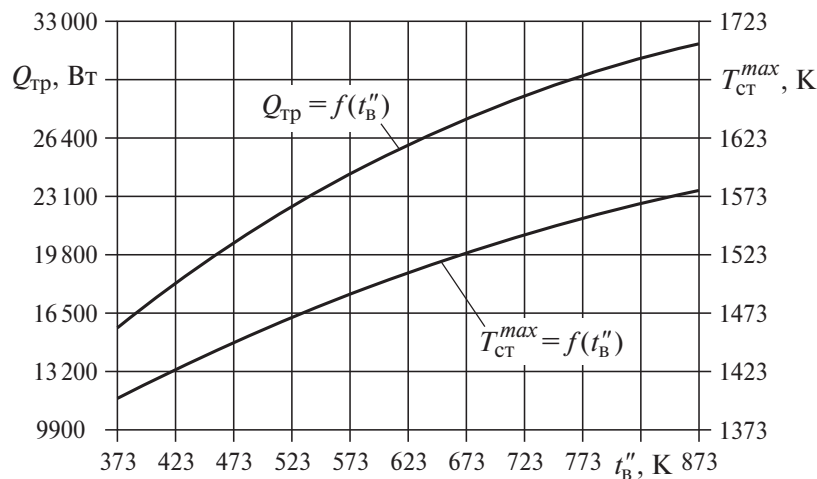


Рис. 3. Зависимости теплового потока в системе “радиационная труба — кладка — изделие” и максимальной температуры стенки радиационной трубы от температуры подогрева воздуха

ный расход топлива на тепловую обработку изделий снижается на 36 %, улучшаются показатели воздействия термической печи на окружающую среду: количество оксидов азота уменьшается в 1,2 раза, оксидов и диоксидов углерода — в 1,7 раза.

Анализ технико-экономической эффективности модернизации термической печи показал, что чистый годовой доход составляет 162 700 руб., а срок окупаемости проекта — 1 год.

Таким образом, полученные результаты подтверждают целесообразность использования предлагаемых разработок при проектировании и эксплуатации термических агрегатов с радиационными трубами.

Список литературы

1. Резанов Е. М. Повышение эффективности работы термических печей. — Омский научный вестник, 2010, № 3(93).
2. Определение оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения топлива в печах с радиационными трубами / А. М. Парамонов, Е. М. Резанов, Е. Н. Рыжкова, О. В. Кожина. — Промышленная энергетика, 2011, № 2.
3. Резанов Е. М. Повышение эффективности работы печей с радиационными трубами на основе утилизации теплоты уходящих газов: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Омск, 2012.