

графия / А.Н. Макаров. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 184 с.

**2. Макаров А.Н.** Влияние геометрических размеров факела на распределение падающих потоков излучений в топке парового котла / А.Н. Макаров, Е.И. Кривнев // Промышленная энергетика. – 2001. – № 8. – С. 30–32.

**3. Техничко-экономическая** эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности. Сообщение 1. Моделирование тепловой работы котлов / С.М. Кабишов [и др.] // Энергетика. Изв. вузов и энергетич. объедин. СНГ. – 2013. – № 6. – С. 67–86.

*УДК 669.041*

**С.М. КАБИШОВ**, канд. техн. наук,  
**И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**М.А. КОСТЕНКО**,  
**А.С. МАСКАЛЬЧУК** (ИЧТПУП «Кератех»)

## **ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ\***

В условиях машиностроительных предприятий для нагрева и термической обработки изделий достаточно широкое распространение получили электрические печи сопротивления.

Анализ существующих конструкций и особенностей процессов тепловой обработки изделий показывает, что зачастую этим печам присущ ряд конструктивных недостатков, что сказывается на их энергопотреблении.

Среди основных путей модернизации шахтных печей сопротивления можно выделить следующие:

1. Замена футеровки на современные волокнистые материалы либо применение многослойной конструкции из жаростойких бетонов малой плотности.

2. Замена нагревательных элементов с применением современных материалов и сплавов, что обеспечивает увеличение межремонтного периода и снижение эффекта изменения свойств нагревательных элементов в процессе работы.

3. Применение принудительной конвекции в рабочем пространстве печи с целью сокращения времени термообработки (нагрева и охлаждения).

4. Применение современных систем АСУ ТП.

Первое направление (использование современных волокнистых материалов) получило достаточно широкое распространение, как при модернизации газовых печей, так и электрических [1–4]. При этом наибольший эффект от снижения энергопотребления достигается для печей, работающих в периодическом режиме с частыми сменами тепловых режимов и, следовательно, периодов нагрева и охлаждения за счет уменьшения потерь на аккумуляцию теплоты кладкой, разогрев печи в технологическом процессе и т.д.

Специалистами предприятия НПО «ТеплоКонструкция» (Россия), основным направлением которого является строительство новых и модернизация существующих промышленных печей и тепловых агрегатов [5], отмечено, что применение современных волокнистых материалов позволяет создавать новые, легкие конструкции футеровок, что делает возможным в несколько (до 8–10) раз снизить массу футеровки и, соответственно, в 2–3 раза массу металлоконструкций печи. Теплота, аккумулируемая футеровкой за время выхода на рабочую температуру, уменьшается также в несколько раз. Резко сокращается время разогрева печи, позволяя экономить не только энергоресурсы, но и уменьшать непроизводительное время работы печи и обслуживающего персонала. К несомненному достоинству волокнистых материалов следует отнести большое количество теплосмен (до 1000–2000) без значительных изменений качества материала, что особенно важно для печей периодического действия.

Опыт реконструкции термического оборудования специалистов Института керамического машиностроения «Кераммаш» (Украина) показал, что именно использование современных волокнистых материалов дает наибольшее повышение энергоэффективности периодических печей и печей с «рваным» циклом эксплуатации, при этом срок эксплуатации такой футеровки составляет 8–15 лет [6].

Для повышения срока службы огнеупорных материалов термических печей (в том числе шахтных печей сопротивления) используется также нанесение керамического покрытия на поверхность футеровок из кирпича, бетона и керамического волокна, что позво-

ляет сократить расход энергии на 15–30 %, увеличить срок службы изделий до 7 раз [7].

Опыт использования муллитокремнеземистого войлока на примере камерной электропечи сопротивления показал снижение теплоты на разогрев печи в 2 раза, расход электроэнергии на 20 % [8].

Вторым важным мероприятием повышения энергоэффективности работы термических электропечей является применение нагревательных элементов из современных материалов и сплавов. В работе [5] отмечено, что современные сплавы с высоким омическим сопротивлением (ЕВРОФЕХРАЛЬ GS 23-5, СУПЕРФЕХРАЛЬ GS SY и др.) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными сплавами «Фехраль» и дорогостоящей нихромовой проволокой, такими как более высокая температура эксплуатации электропечи (до 1350 °С), более длительный срок службы (в 2–2,5 раза). В печах с футеровкой из волокнистых материалов проволочные электронагреватели, как правило, размещают на керамических трубках, что повышает технологичность монтажа и ремонта.

Для термических печей одним из факторов снижения расхода электроэнергии является сокращение времени термической обработки изделий, что достигается за счет организации в рабочем пространстве печи режима принудительной конвекции. Такой прием, наряду с герметизацией затворов подовых тележек, дверей, заслонок, крышек с использованием современных прошивных рулонных, шнуровых, тканевых и др. муллитокремнеземистых материалов, дает не только экономию электроэнергии (на уровне 5–10 %), но и повышает качество обрабатываемых материалов и производительность термического оборудования [5].

Применение современных систем АСУ ТП является на современном этапе обязательным условием надежного и экономичного функционирования технологических агрегатов. Реализация комплекса мероприятий (факторов управления), позволяющих оптимизировать и автоматизировать тепловые режимы печей, обеспечивает в целом минимизацию расхода энергоносителей на 15–20 % [2].

Опыт работы печей сопротивления показывает, что эффективность мероприятий в рамках указанных направлений зависит от особенностей конструкции, степени загрузки печи и режима ее работы. Для того, чтобы еще на стадии проектирования или модернизации печи оценить степень эффективности того или иного способа,

целесообразно установить определенные критерии, дающие возможность без сложных теплотехнических расчетов решить данную задачу.

Так как шахтные печи являются агрегатами периодического действия, в качестве критерия, позволяющего оценить энергоэффективность замены футеровки целесообразно использовать критерий, представляющий собой отношение количества теплоты, аккумулируемого кладкой в процессе разогрева до и после модернизации. Согласно работе [9] теплота, аккумулируемая кладкой, равна:

$$Q_{\text{акк}} = \sum F_i \cdot \Delta t_i \sqrt{\lambda_i c_i \rho_i \tau_p},$$

где  $F_i$  – средняя площадь  $i$ -го слоя футеровки,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_i$  – изменение средней температуры слоя,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda_i$ ,  $c_i$ ,  $\rho_i$  – коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность материала  $i$ -го слоя футеровки при средней температуре;  $\tau_p$  – время нагрева  $i$ -го слоя футеровки.

Тогда критерий запишем следующим образом:

$$k_{\text{акк}} = \frac{\sqrt{\tau_p} \sum (F_i \cdot \Delta t_i \sqrt{\lambda_i c_i \rho_i})}{\sqrt{\tau'_p} \sum (F'_i \cdot \Delta t'_i \sqrt{\lambda'_i c'_i \rho'_i})}.$$

Здесь штрих соответствует параметрам футеровки после модернизации печи.

Так как при периодическом режиме работы для оценки температуры необходимо решать задачу нестационарной теплопроводности с изменяющимися граничными условиями, для предварительной оценки эффективности замены футеровки представляется возможным определить значение  $k_{\text{акк}}$  при нагреве печи до стационарного состояния.

В случае, если шахтные печи работают в непрерывном режиме (в условиях крупносерийного производства), затраты теплоты на аккумуляцию кладкой с достаточно высокой точностью можно определить, просуммировав потери теплоты через ограждающие конструкции в окружающую среду за период разгрузки-загрузки и среднее значение потерь излучением через открытые окна печи. При этом при помощи известных методик [например, 9–11 и др.] доста-

точно определить температуру на границе слоев и соответствующие значения теплофизических характеристик материала.

Учитывая, что температура на излучающих нагретых поверхностях кладки снижается нелинейно, целесообразно определить среднелогарифмическое значение теплового потока излучением за период выгрузки-загрузки. Для этого необходимо задаться изменением температуры излучающих поверхностей. Согласно экспериментальным данным, полученным при исследовании тепловой работы нагревательных колодцев [11], температура внутренних поверхностей кладки при остановке на 5–15 мин ориентировочно падает на 50–150 °С. Тогда:

$$\bar{Q}_{\text{изл}} = \frac{Q_{\text{изл}}^{\text{нач}} - Q_{\text{изл}}^{\text{кон}}}{\ln \frac{Q_{\text{изл}}^{\text{нач}}}{Q_{\text{изл}}^{\text{кон}}}}.$$

В остальной период работы печи можно считать, что кладка находится в квазистационарном состоянии. Тогда для расчета наружной температуры кладки для шахтных печей, имеющих цилиндрическую форму корпуса, можно записать:

$$\alpha(t_{\text{нар}} - t_{\text{о.с}}) = \frac{2\pi l(t_{\text{внутр}} - t_{\text{нар}})}{\sum \left( \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)},$$

где  $d_i$  и  $d_{i+1}$  – внутренний и наружный диаметры слоя футеровки;  $l$  – высота печи.

Так как большая часть шахтных печей применяется для термообработки деталей и заготовок, что предполагает значительную продолжительность технологических процессов, стационарного состояния кладка может достичь именно в период выдержки. Тогда температуру внутренней поверхности кладки  $t_{\text{внутр}}$  можно принять равной температуре печи (для печей шахтного типа можно принять,

что  $t_{\text{печ}} = t_{\text{выд}}$ , т.е. температура печи равна температуре периода выдержки). С учетом этого запишем

$$t_{\text{нар}} = \frac{2\pi l t_{\text{печ}} + \alpha \sum \left( \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) t_{\text{о.с}}}{\alpha \sum \left( \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + 2\pi l}.$$

Значения коэффициента теплоотдачи могут быть приняты в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [12] либо рассчитаны с учетом лучистого и конвективного теплообмена поверхности стенки с окружающей средой.

Из последнего выражения следует, что температура на поверхности печи равна:

$$t_{\text{нар}} = \frac{t_{\text{печ}} + t_{\text{о.с}} \alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{\alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + 1}.$$

Помимо оценки затрат теплоты на разогрев печи и потерь через ограждающие конструкции при работе в квазистационарном режиме целесообразно определить, как изменится время прогрева футеровки печи после модернизации. Для решения этой задачи воспользуемся формулой [11], которая позволяет оценить время нагрева пластины до заданной температуры (средней по сечению) при известной плотности теплового потока  $q$ :

$$\tau = \frac{\delta \cdot \rho \cdot \Delta t}{2 \cdot q}.$$

Для выполнения ориентировочных расчетов можно принять, что степень черноты старой и новой футеровки отличаются незначительно и плотность теплового потока в процессе нагрева будет для обоих вариантов одинаковой. Среднюю температуру футеровки в

стационарном состоянии будем также считать одинаковой для обоих вариантов и равной:

$$t = \frac{t_{\text{печ}} + t_{\text{о.с.}}}{2}.$$

Тогда отношение времени прогрева существующей и новой футеровки до указанной средней температуры будет иметь вид:

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{\text{сущ}}}{\tau_{\text{мод}}} = \frac{\delta \rho \Delta i}{\delta' \rho' \Delta i'},$$

где параметры нового материала приведены в знаменателе со штрихами.

Приведенные выражения позволяют оперативно оценить энергоэффективность использования новых футеровочных материалов при модернизации шахтных печей сопротивления.

## Литература

**1. Немзер, Г.Г.** Теплотехнология кузнечно-прессового производства / Г.Г. Немзер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1988. – 320 с.

**2. Тимошпольский, В.И.** Обзор основных направлений модернизации печного парка и совершенствование технологий нагрева и термической обработки слитков и заготовок в условиях современного машиностроительного предприятия / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, Д.В. Менделев // Литье и металлургия. – 2007. – № 4. – С. 54–62.

**3. Расчет** и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла / В.И. Тимошпольский [и др.] // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2008. – № 4. – С. 34–43.

**4. Повышение** эффективности работы термических печей сопротивления в условиях ОАО МАЗ / И.А. Трусова [и др.] // Литье и металлургия. – 2011. – № 2. – С. 163–166.

**5. Svsteplo.ru:** электронный ресурс. Энергосбережение при строительстве и модернизации промышленных печей и тепловых агрегатов / Батурин С.П., Катушкин А.С.

**6. Kerammash.ua:** электронный ресурс. Реконструкция термического оборудования. Цели и методы / Згоденко Р.А.

**7. Energy.csti.yar.ru:** электронный ресурс. Экономия энергии в промышленных печах при нанесении керамического покрытия на футеровку и металлические элементы конструкций.

**8. Брусницын, А.П.** Совершенствование элементов конструкции электрической печи сопротивления / А.П. Брусницын, Е.В. Киселев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. III Всерос. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27–29 марта 2014 г. / УрФУ. – Екатеринбург, 2014. – С. 10–13.

**9. Расчеты** нагревательных печей / С.И. Аверин [и др.]. – Харьков: Техника, 1969. – 540 с.

**10. Металлургические печи.** Теория и расчеты: Учебник. В 2 т. Т.2. / В.И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 832 с.

**11. Гусовский, В.Л.** Методика расчета нагревательных и термических печей / В.Л. Гусовский, А.Е. Лившиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.

**12. Арендарчук, А.В.** Общепромышленные печи периодического действия / А.В. Арендарчук, А.С. Бородачев, В.И, Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.