



The state of gas-furnace economy is examined, the calculation analysis of the main thermal-technical characteristics is carried out and the main ways of increase of efficiency of the heating and thermal furnaces heat working are given at the example of RUP "Minsk automobile plant".

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси,
М. Л. GERMAN, РУП «БелТЭИ» Министерства энергетики,
Д. В. МЕНДЕЛЕВ, Белорусский национальный технический университет

УДК 669.071

ОБЗОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЕЧНОГО ПАРКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ НАГРЕВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Анализ современного состояния парка нагревательных и термических печей

Наряду с необходимостью дальнейшего наращивания объемов производства машиностроительной продукции Директивой Президента Республики Беларусь №3 «Экономия и бережливость — главные факторы экономической безопасности государства» от 14 июня 2007 г. поставлены задачи по разработке и реализации программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2007–2010 гг.

В работе [1] выполнен анализ состояния печного парка машиностроительного комплекса, при этом отмечено, что существующие технологии тепловой обработки материалов являются чрезвычайно энергозатратными, о чем свидетельствует уровень теплового к.п.д. — 5–15%.

Ниже на примере РУП «Минский автомобильный завод» рассмотрено состояние газопечного хозяйства, выполнен расчетный анализ основных теплотехнических характеристик и приведены основные пути повышения эффективности тепловой работы нагревательных и термических печей.

В топливно-энергетическом балансе РУП «МАЗ» при общем потреблении на уровне 175 тыс. т у.т. доля непосредственно природного газа составляет 21%, а вместе с тепловой энергией, при производстве которой используется природный газ, — 48%.

Анализ состояния парка нагревательных и термических печей РУП «МАЗ» показал следующее.

На РУП «МАЗ» установлено более 300 ед. газопотребляющего оборудования, в том числе:

- печи (включая нагревательные, химико-термические, эндогенераторы и установки дожига ваграночных газов) — 113 шт.;
- сушильные установки — 46 шт.;
- котельные агрегаты — 12 шт.;
- газовые посты (резка металла и пр.) — 147 шт.;
- литейные автоматы и полуавтоматы — 16 шт.;
- прочее оборудование с небольшим потреблением газа — 13 шт.;
- установки газовые горелки инфракрасного излучения (ГГИИ) — 238 шт.

Общий объем потребления природного газа в 2006 г. на РУП «МАЗ» составил 31 543 тыс. м³, а расход его только на печи — 18 857 тыс. м³, или примерно 60% от общего потребления.

На рис. 1–4 показано состояние парка нагревательных и термических печей РУП «МАЗ».

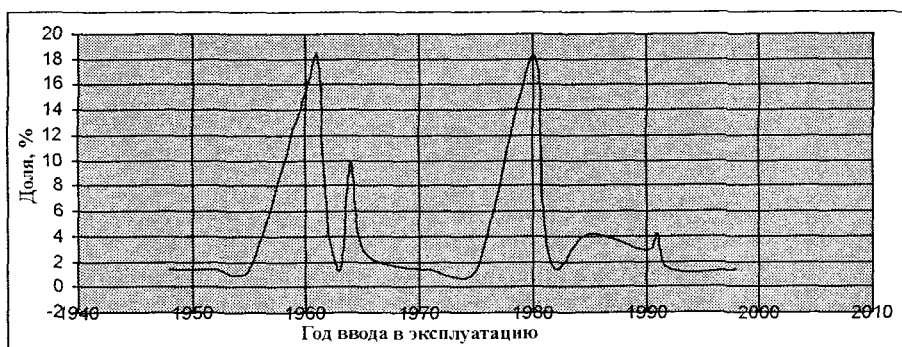


Рис. 1. Распределение нагревательных и термических печей по году ввода в эксплуатацию

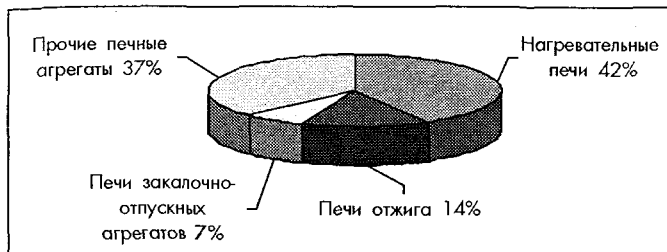


Рис. 2. Распределение термических и нагревательных печей по заводу

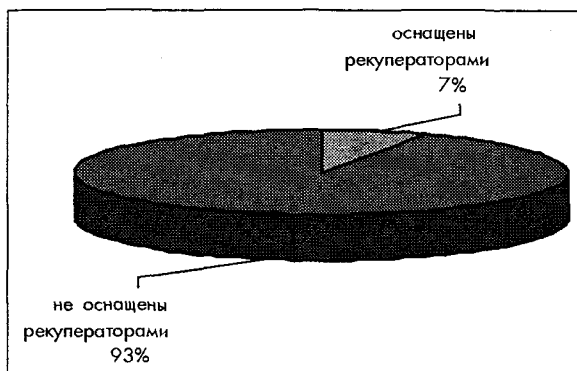


Рис. 3. Наличие на нагревательных и термических печах рекуперации теплоты дымовых газов

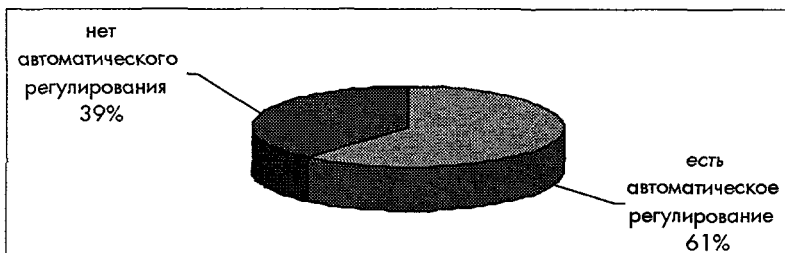


Рис. 4. Наличие на нагревательных и термических печах элементов автоматического регулирования

Очевидно, что необходимость модернизации печного парка нагревательных и термических печей, улучшения их характеристик, а по возможности реконструкция цехов, располагающих значительным количеством печей, — одна из главных задач, стоящих перед заводом в свете сохранения конкурентоспособности своей продукции.

Организация работ по энергосбережению

Работы по энергосбережению включают всебя следующие основные положения.

1. **Проведение энергоаудита**, т.е. обследование энергопотребляющего оборудования, в конкретном случае, парка нагревательных и термических печей предприятия. По результатам такого обследования выполняется анализ состояния оборудования и эффективность мероприятий по энергосбережению и предлагаются пути снижения потребления топливно-энергетических ресурсов.

2. **Разработка плана работ по энергосбережению для предприятий.** Совместно со специалистами и руководством предприятий разрабатывается план работ по применению технологий, направленных на снижение потребления ТЭР.

3. **Разработка проектов модернизации и реконструкции парка термического оборудования.** После утверждения плана работ специалистами разрабатываются проекты реконструкции печей и термического оборудования, при этом, как правило, для одних печей следует провести их реконструкцию, для других может быть проведена частичная модернизация, включающая замену футеровочных материалов на современные высокоэффективные; замену газогорелочной системы (особое значение имеет регулирование процесса горения); утилизацию продуктов сгорания, установку рекуператоров; для электрических печей — доработку конструкции или замену электронагревателей.

При разработке планов модернизации и реконструкции газопечного оборудования следует использовать комплексный подход к определению путей снижения ТЭР, предусматривающий два (по величине затрат) пути:

1) мероприятия, не требующие значительных затрат:

- составление оптимальных графиков загрузки-выгрузки;
 - эксплуатация печей в продолжительном режиме;
 - использование не менее 70% рабочего пространства оборудования;
 - контроль и учет потребления энергоносителей;
 - местные уплотнения частей термического оборудования (заслонок, дверей, других технологических проемов и отверстий);
 - использование вторичных энергоресурсов (отходящих газов, воды) и т.д.;
- 2) мероприятия, предусматривающие затраты на реконструкцию:
 - использование малоинерционных и низко-теплопроводных изоляционных материалов;
 - уменьшение собственной термической массы в виде загрузочных средств, инструмента, оснастки и т.д., обеспечение быстрой и экономичной загрузки;
 - использование новой техники герметизации;
 - внутренняя рекуперация теплоты;
 - рациональное распределение мощности внутри объема термического устройства (реконструкция нагревателей, применение принудительной конвекции);
 - использование современных систем контроля и управления;
 - использование защитных атмосфер вместо воздуха при нагреве выше 600 °С, что уменьшает или полностью исключает потери от образования и удаления окалина;

- применение высокотемпературной термической обработки в вакууме;
- замена закалки и отпуска изотермической закалкой;
- использование высокоэффективных систем сжигания топлива с подачей разогретого воздуха горения;
- переход на малотоннажное термическое оборудование (малоинерционность, модульные конструкции, многоцелевое назначение);
- переход на поверхностный нагрев там, где можно не осуществлять объемный (скоростной нагрев, нагрев ТВЧ, индукционный).

В зависимости от состояния парка нагревательных и термических печей и технологического назначения печей, объема производства и т.д. осуществляется выбор наиболее энергоэффективных мероприятий.

Методика расчета теплотехнических и технико-экономических показателей печей

Одним из этапов выполнения энергоаудита печи, т.е. обследования печного агрегата, является определение теплотехнических и технико-экономических показателей на основе проведения теплового баланса. Приведем результаты расчета теплового баланса одной из нагревательных печей РУП «МАЗ» для нагрева заготовок под штамповку, используя методику расчета, описанную в [2-4].

Исходные данные для расчета: операция – нагрев под штамповку; производительность печи $P=1000$ кг/ч; $d=150$ мм; $l=200$ мм; конечная температура нагрева металла $T_{м.к.}=1250$ °С.

Приходные статьи баланса

1. Химическая теплота топлива

$$Q_{хим} = Q_H^P B = 35,5 B \text{ МДж/ч}, \quad (1)$$

где $Q_H^P = 35,5$ МДж/м³ – низшая теплота сгорания топлива (природный газ); B – расход газа, м³/ч.

2. Теплота подогретого воздуха

$$Q_B = BL_{\alpha} i_B = 0, \quad (2)$$

где L_{α} – действительный расход воздуха на горение; i_B – энтальпия 1 м³ воздуха при температуре t_B . Поскольку рекуперация теплоты (т.е. рекуператор) отсутствует, то эта статья прихода в расчете не учитывается.

3. Теплота подогретого топлива

$$Q_T = Bc_0' t_T = 0, \quad (3)$$

где c_0' – средняя теплоемкость газа; t_T – температура топлива. В конкретном случае $Q_T = 0$, т.е. предварительный подогрев топлива отсутствует.

4. Теплота, вносимая в печь технологическими материалами (в частности, вследствие экзотермических реакций окисления металла). Ввиду того что температура нагрева металла (из технических

данных) равна 1250 °С, то данная статья прихода будет иметь место в настоящем расчете:

$$Q_{экс} = Q_{ок} Pa / 100 = 28,25 \text{ МДж/ч}, \quad (4)$$

где $P=1000$ кг/ч – производительность печи. В конкретном случае из технических данных известно, что производительность определяется диаметром нагреваемой заготовки, поэтому будем считать, что диаметр заготовки таков, что производительность печи равна выбранному значению; $a=0,5\%$ – угар металла; $Q_{ок} = 5650 \cdot 10^3$ Дж/кг – теплота реакций окисления стали.

Расходные статьи баланса

1. Расход теплоты на нагрев металла:

$$Q_M = P(i_M^K - i_M^H) = P c_M (T_{м.к.} - T_{м.н.}) = 827,8 \text{ МДж/ч}, \quad (5)$$

где $c_M = 0,673$ кДж/(кг·К) – средняя удельная теплоемкость металла; $T_{м.н.} = 293$ К, $T_{м.к.} = 1523$ К – средние по объему металла начальная и конечная температуры.

2. Расход теплоты с дымовыми газами, покидающими печь:

$$Q_{yx} = BV_D c_D T_{yx} = 23,161 B \text{ МДж/ч}, \quad (6)$$

где $V_D = V_0' + (\alpha - 1)V_0 = 10,26 + (1,05 - 1) \cdot 9,25 = 10,7225$ м³ – объем дымовых газов; V_0 – объем воздуха, необходимый для горения;

$c_D = 1,6$ кДж/(м³·°С) – удельная теплоемкость дымовых газов; $T_{yx} = T_{м.к.} + 100 = 1350$ °С – температура уходящих дымовых газов; α – коэффициент расхода воздуха; V_0' – объем продуктов сгорания, который рассчитывается по результатам горения топлива.

3. Потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания:

$$Q_{хим} = Q_H^P q_{хим} = 1,1 \text{ МДж/ч}, \quad (7)$$

где $q_{хим} \approx 0,03$ – доля потерь.

4. Расход теплоты вследствие потерь через футеровку печи:

$$Q_{кл} = \frac{t_{печи} - t_{вн.из.}}{\sum_{i=1}^n (S_i / \lambda_i)} F_{из} = 66361 \text{ Вт} = 239 \text{ МДж/ч}. \quad (8)$$

Основные размеры печи: $F_{из} = 25$ м² – наружная площадь изоляции; S_i / λ_i – тепловые сопротивления (отношения толщины слоев футеровки к их коэффициентам теплопроводности), м²·°С/Вт. Футеровка состоит из материалов, приведенных ниже.

Номер слоя	Материал	Толщина слоя, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	Шамот	0,46 (2x0,23)	$0,7 + 6,4 \cdot 10^{-4} t$
2	Асбестовый картон	0,005	$0,16 + 1,4 \cdot 10^{-4} t$

Для вычисления температур стыков слоев, а также внешней поверхности изоляции необходимо найти перепады температур в каждом слое:

$$\Delta t_1 = \frac{S_1}{\lambda_1(t=0)} \frac{(t_{\text{печи}} - t_{\text{окр.среды}})}{\left(\frac{S_1}{\lambda_1(t=0)} + \frac{S_2}{\lambda_2(t=0)} + 0,06 \right)} = \frac{0,46}{0,7} \frac{(1250 - 20)}{\left(\frac{0,46}{0,7} + \frac{0,005}{0,16} + 0,06 \right)} = 1080 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{12} = t_{\text{печи}} - \Delta t_1 = 1250 - 1080 = 170 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_2 = \frac{S_2}{\lambda_2(t=0)} \frac{(t_{12} - t_{\text{окр.среды}})}{\left(\frac{S_2}{\lambda_2(t=0)} + 0,06 \right)} = \frac{0,005}{0,16} \frac{(170 - 20)}{\left(\frac{0,005}{0,16} + 0,06 \right)} = 51,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{из}} = t_{12} - \Delta t_2 = 170 - 51,4 = 118,6 \text{ }^\circ\text{C},$$

где t_{12} – температура стыка футеровочных материалов; $t_{\text{из}}$, $t_{\text{печи}}$ – температура внешней и внутренней поверхности футеровки.

Средние температуры, а также коэффициенты теплопроводности слоев футеровки будут иметь значения:

$$t_{1\text{ср}} = \frac{t_{\text{печи}} + t_{12}}{2} = 710 \text{ }^\circ\text{C}, \lambda_1 = 1,1544 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)},$$

$$t_{2\text{ср}} = \frac{t_{12} + t_{\text{из}}}{2} = 144,3 \text{ }^\circ\text{C}, \lambda_2 = 0,1802 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}.$$

5. Потери теплоты излучением через открытые окна и дверцы печи:

$$Q_{\text{изл}} = C_0 \left[(T_{\text{печи}}/100)^4 - (T_{\text{ви}}/100)^4 \right] \Phi F = 101321,8 \text{ Вт} \approx 364,76 \text{ МДж/ч},$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; F – площадь открытого окна, м^2 ; $\Phi = 0,5(1 + \varphi_{12})$ – коэффициент диафрагмирования; $\varphi_{12} = \frac{L}{L+s}$ – угловой коэффициент с излучающей плоскости на тепло-

воспринимающую; s – толщина стенки, м;

$L = \frac{2abs}{ab+bs+as}$. По техническим данным при-

нимаем: окно загрузки с параметрами $1,2 \times 0,3 \times 1,235 \text{ м}$ и окно выгрузки с параметрами $0,58 \times 0,3 \times 1,020 \text{ м}$. Тогда получим значения для обоих окон:

$$L_{\text{загр}} = 0,402 \text{ м}, \varphi_{12} = 0,246, \Phi = 0,6230,$$

$$F = 0,360 \text{ м}^2,$$

$$L_{\text{выгр}} = 0,331 \text{ м}, \varphi_{12} = 0,245, \Phi = 0,6225, \quad (12)$$

$$F = 0,174 \text{ м}^2,$$

$$Q_{\text{изл}} = Q_{\text{изл.загр}} + Q_{\text{изл.выгр}}. \quad (13)$$

6. Потери на нагрев поддонов и прочих транспортирующих устройств отсутствуют:

$$Q_{\text{тр}} = 0. \quad (14)$$

7. Потери теплоты через металлические стержни и вставки в футеровке печи:

$$Q_{\text{т.к.з}} = Q_{\text{кл}} = 239 \text{ МДж/ч}. \quad (15)$$

8. Неучтенные потери:

$$Q_{\text{неучт}} = 0,3(Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{т.к.з}}) = 252,828 \text{ МДж/ч}. \quad (16)$$

Приравняв приходные и расходные статьи теплового баланса, найдем расход газа в печи:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}},$$

$$35,5B + 28,25 = 827,8 + 23,161B + 1,1 +$$

$$+ 239 + 364,76 + 239 + 252,828, \quad (17)$$

$$B = 154 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{\text{печи}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{загр}}} \cdot 100\% = \frac{Q_{\text{М}}}{Q_{\text{хим}}} \cdot 100\% = 15\%. \quad (18)$$

Удельный расход условного топлива:

$$b = \frac{Q_{\text{T}}}{P} = 1,15 \cdot \frac{35,5B}{P} = 1,15 \cdot \frac{35,5 \cdot 154}{1000} = 6,29 \text{ МДж/кг} = 215 \text{ кг.у.т./т}. \quad (19)$$

Выполним аналогичный расчет теплотехнических и технико-экономических показателей нагревательной печи ТГ-1, разработанной специалистами НАН Беларуси и БНТУ [1] с учетом последних современных тенденций в печестроении. Результаты сравнения основных характеристик (табл.1) показывают, что удельный расход условного топлива снизился практически в 2 раза, а коэффициент полезного действия возрос до 40%.

Таблица 1. Сравнительная характеристика новой печи [1] и печи РУП «МАЗ»

Тип печи	КПД печи, %	Удельный расход условного топлива, кг у.т./т
Печь ТГ1 (новая печь)	40	73
Печь РУП «МАЗ»	10–15	300–215

Рассмотрим подробнее основные направления модернизации нагревательных и термических печей.

Основные направления модернизации печного парка

1. Меры повышения герметичности рабочего пространства

Недостаточная герметичность рабочего пространства существующих печей обусловлена в основном значительными размерами затворов, необходимых для выкатывания пода, и фильтрацией продуктов сгорания через свод рабочего пространства. Эти недостатки можно легко устранить подъемом пода в конечном положении для доведения размеров затвора до минимума и применением металлической обшивки свода печи [5], а также одновременным опусканием заслонки для закрытия проемов печи, отделанной теплоизолирующим материалом, с выкатыванием пода. Швы и крепежные болты футеровки должны быть заделаны, например, огнеупорными замазками.

2. Выбор типа тепловой изоляции

В настоящее время применяют высокоэффективные огнеупорные и теплоизоляционные материалы, обеспечивающие надежную и долговечную работу печей при следующих температурах длительного применения (волокнистые материалы из базальтовых и муллитокремнеземистых волокон, вспененные материалы):

- 1) до 750 °С – плиты и картоны из базальтовых волокон плотностью от 140 до 220 кг/м³;
- 2) до 875 °С – перлитокерамика, пенодиатомит, вермикулит плотностью до 350 кг/м³;
- 3) до 1200 °С – муллитокремнеземистые материалы: фетр, войлок и рулонный материал плотностью до 200 кг/м³;
- 4) до 1500 °С – муллитокремнеземистые материалы: фетр, плиты на высокотемпературном связующем.

Футеровка из волокнистых материалов обеспечивает минимальные потери с поверхности печи и минимальные затраты энергии на ее разогрев после остановок. Поверхность футеровки не пылит и не разрушается при наличии воздушных потоков со скоростью до 6 м/с. Кроме того, конструкция футеровки обеспечивает простоту и удобство монтажа, а также достаточную ремонтпригодность. Конечный выбор материалов зависит от теплофизических и прочностных характеристик, стоимости 1 м² кладки и принимается после теплотехнических и экономических расчетов.

Альтернативой футеровке рабочего пространства из штучных огнеупорных материалов может быть малоинерционная футеровка с повышенными теплоизоляционными свойствами, выполненная из легковесных волокнистых огнеупорных материалов или футеровок специальных конструкций из керамических и композиционных материалов и бетонов [6]. Также для повышения радиационной составляющей теплового потока от футеровки в камере печи внутренний слой изоляции может быть покрыт огнеупорной светоотражающей обмазкой на основе микросфер из кварцевого стекла. При этом увеличение стоимости футеровки компенсируется ее значительными преимуществами по сравнению с футеровкой из штучных огнеупорных материалов.

Следует отметить, что новые футеровочные материалы в виде волокнистых плит стоят в несколько раз дороже, чем традиционный шамотный кирпич. Поэтому для снижения стоимости используемой футеровки можно применить трехслойную схему: для внутреннего слоя изоляции используются наиболее термостойкие (наиболее дорогие) плиты толщиной 100 мм, выдерживающие температуру до 1430 °С; второй слой изготавливается из более дешевых плит такой же толщины, выдерживающих температуру до 1260 °С; наконец, наружный слой изоляции толщиной 100 мм изготавливается из еще более дешевого волокнистого материала Paros, выдерживающего температуру до 700 °С. Такая схема футеровки печи вполне уже себя оправдала на созданной печи ТГ-1 НАН Беларуси [1].

3. Использование теплоты отходящих продуктов сгорания

Повышением эффективности использования тепла отходящих газов должно стать использование рекуператоров и тепловых регенераторов как для подогрева компонентов горения, так и в качестве вторичных энергоресурсов (ВЭР) с переходом в перспективе на безотходные по теплу и вредным выбросам комплексы [6].

Использование теплоты уходящих газов в промышленных печах позволяет повысить КПД печи, снизить удельный расход топлива на тепловую обработку материала, интенсифицировать процессы горения топлива и нагрева металла. Так, например, разработка и внедрение производственным научно-исследовательским институтом Дюссельдорфа при содействии с промышленными фирмами Германии тепловых регенераторов DREBS и ROREBS, имеющих высокую степень рекуперации теплоты, позволили сократить по-

требление топлива на 30–40% в печах кузнечных цехов в сравнении с использованием устаревшей системы рекуператоров [7].

Однако целесообразно установить максимально возможную, экономически оправданную степень рекуперации теплоты уходящих газов. Значение оптимальной степени рекуперации теплоты для конкретного значения температуры уходящих дымовых газов можно найти исходя из минимума функции приведенных затрат на рекуператор и топливо при приравнивании к нулю частных производных этой функции по оптимизируемому параметру [8]:

$$\frac{\partial Z_p}{\partial P} = C_\tau \frac{\partial B}{\partial P} + C_p \frac{\partial H_p}{\partial P} = 0, \quad (20)$$

где Z_p – приведенные затраты по рекуператору и топливу, руб/год; P – степень рекуперации теплоты уходящих газов; B – расход топлива, м³/год (или кг/год); H_p – площадь поверхности нагрева рекуператора, м²; C_τ – стоимость топлива, руб/ м³ (или руб/кг); C_p – приведенная годовая стоимость (руб/(м³·год)) нагрева 1 м² поверхности рекуператора.

Приведенный расчет в [8] показывает, что с повышением стоимости топлива и времени работы нагревательной печи значение $P_{\text{опт}}$ увеличивается, а повышение стоимости рекуператора приводит к снижению $P_{\text{опт}}$.

4. Выбор типа газогорелочных устройств

Выбор горелок следует производить с учетом максимального удовлетворения требований технологии и общих требований к устройствам для сжигания топлива. Поэтому ошибочны высказываемые иногда мнения об универсальности какого-либо одного типа горелок и абсолютном превосходстве этого типа над остальными. Не существует “хороших” или “плохих” типов горелок, а есть только подходящие или неподходящие для данных конкретных условий. Работая в составе печного оборудования, горелочные устройства должны удовлетворять общим техническим требованиям, регламентированными стандартами. Одним из таких требований (требование экономного использования топлива) является то, что газовые горелки при номинальной тепловой мощности должны обеспечивать коэффициент расхода воздуха, не превышающий значений:

- 1,05 – горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением; инжекционные горелки с полным предварительным смешением;
- 1,05–1,15 – горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением;
- 1,15 – горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки

с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения.

Это требование не распространяется на газовые запальные горелки и горелки, предназначенные для работы с переменными или повышенными коэффициентами расхода воздуха, а при работе горелок в системах отопления тепловых агрегатов, предусматривающих многостадийное (ступенчатое) сжигание топлива, значения коэффициентов расхода воздуха, указанных выше, следует относить к выходному сечению камеры горения теплового агрегата (за вычетом присосов). Допустимое увеличение коэффициента расхода воздуха в диапазоне рабочего регулирования мощности (за исключением пусковых режимов) не должно превышать 0,2 [9].

5. Повышение КПД и снижение расхода топлива нагревательных печей на базе расчетных методов

1. Обоснована необходимость проектирования нагревательных печей с пониженным пирометрическим коэффициентом. Общий КПД η и термический КПД η_T прямо пропорциональны коэффициенту использования топлива $\eta_{\text{ит}}$ и линейно зависят от пирометрического коэффициента $\eta_{\text{пир}}$, причем чем меньше $\eta_{\text{пир}}$, тем выше термический η_T и общий η КПД печи. Это также позволяет снизить расход топлива нагревательных печей. Все вычисления приведены в работе [10].

2. Результаты расчетов и их анализ в [11] показывают, что при трехсменном режиме работы печи очередность нагрева типоразмеров заготовок не влияет на удельные потери теплоты кладкой. Эффект получается при одно- и двухсменном режиме работы и условии, что очередность нагрева заготовок различных типоразмеров устанавливается в порядке возрастания параметра стабилизации

$$Kl = \frac{\alpha_\Sigma \tau}{cR_\phi m}, \quad (21)$$

где α_Σ – коэффициент теплоотдачи, учитывающий радиационную и конвективную составляющие, Вт/(м²·К); τ – время нагрева заготовки, с; c – теплоемкость металла, Дж/(м³·К); R_ϕ – обобщенный размер заготовки, м; m – поправка на массивность. При этом потери теплоты в окружающую среду снижаются на 1–3%, а удельные потери на нагрев кладки, усредненные за цикл работы печи (сутки), для двух- и односменного режимов работы снижаются соответственно на 5,3 и 2,7% по сравнению с произвольной очередностью нагрева типоразмеров заготовок и на 23,2 и 14% по сравнению с очередностью нагрева типоразмеров заготовок по убыванию параметра стабилизации. В целом использование критерия стабилизации для распределения типоразмеров заготовок между печами позволяет снизить расход топлива на группу печей.

6. Наличие АСУТП печи

В современных нагревательных и термических печах машиностроительных предприятий наличие АСУТП необходимо и обосновано: позволяет производить автоматический розжиг и контроль горелок; управлять механикой системы “выкатной под-заслонка”; реализовать сложные режимы нагрева; проводить регулирование давления в печи; проводить и регулировать бесконтактное тепловизионное измерение поля температуры внутри печи; осуществлять контроль уходящих дымовых газов; проводить контроль и управление состоянием всех приборов печи.

Комплекс всех перечисленных выше возможностей позволяет проводить оптимальную работу печи, что сказывается на ее КПД и расходе топлива.

7. Совершенствование технологий, а также организация режимов нагрева и термической обработки слитков и заготовок

Как отмечено в работе [12], возможности дальнейшей интенсификации процессов нагрева металла в высокотемпературных установках за счет увеличения доли радиационной составляющей теплообмена практически исчерпаны, поскольку температура греющей среды лимитируется огнеупорностью используемых в печестроении материалов, а степень черноты поверхностей теплообмена близка к единице.

Поэтому новые технологии и оборудование в кузнечно-штамповочном производстве определили требования к нагреву заготовок и основные направления совершенствования оборудования для нагрева. В наибольшей степени условиям интенсивной тепловой обработки заготовок на производствах из газопечного оборудования отвечает прямой струйный или струйно-факельный нагрев [12–16]. В этом случае высокотемпературные струи продуктов горения, направленные на нагреваемый металл, обеспечивают сокращение в 2–3 раза времени на разогрев печи, повышение на 20–30% производительности или сокращение расхода топлива [17]. При таком нагреве значительно уменьшаются угар металла, который в пламенных методических или полуметодических печах достигает 2–3% от массы заготовки, а также обезуглероживание и обеднение поверхностных слоев металла легирующими элементами. Такой эффект возникает за счет резкого (в несколько раз) увеличения теплоотдачи конвекцией при поперечном обтекании заготовки высокотемпературными (до 1700°C) струями газов, направленными из газовых горелок со скоростью 60 м/с и более.

Так, например, в работе [13] определены допустимые плотности тепловых потоков к нагреваемой поверхности для различных марок сталей в зависимости от теплофизических свойств и

поперечных размеров. В данной работе также приведены методика и результаты расчетов, которые могут быть использованы при конструировании печей скоростного струйного нагрева.

Однако необходимо также отметить, что сам по себе струйный конвективный нагрев, позволяя достичь высоких значений плотности теплового потока на металл, имеет объективно присущий ему недостаток – локальность подвода тепла, наблюдаемую в зоне взаимодействия струи с поверхностью нагреваемого металла. Однако указанное обстоятельство вызывает неравномерность прогрева металла не только по его толщине, но и в радиальном направлении. Этот фактор особенно заметно проявляется в условиях пониженной температуры кладки, что характерно для печей струйного нагрева, поскольку лучистая составляющая перестает играть доминирующую роль. В технологическом плане локальность подвода тепла сказывается в потере качества нагретого металла. С теплотехнической точки зрения отрицательное воздействие указанного фактора можно минимизировать увеличением числа струй, рациональным выбором схемы их расположения, соответствующим подбором мест отвода продуктов сгорания топлива из печи, а также формированием сносящего потока [18, 19].

Печи скоростного струйного нагрева по скорости и качеству близки к индукционным печам, но имеют преимущества по универсальности, а главное по значительно более низким капитальным и эксплуатационным затратам. Несмотря на такие достоинства, до настоящего времени печи скоростного струйного нагрева внедрялись в промышленность медленно и трудно, так как имеют ряд отличий, которые можно было бы решить, имея современную АСУТП печи:

1) температура в рабочем пространстве слабо связана с температурой металла на выходе из печи, что исключает возможность использования традиционных методов контроля и управления процессом нагрева и вызывает опасность пережога металла;

2) значительно более сильное влияние гидравлического режима печи на тепловой режим, чем в обычных печах. Это объясняется тем, что при нагреве заготовок высокоскоростными струями продуктов горения и малых размерах рабочего пространства создается большой скоростной напор;

3) особенности выхода этих печей на рабочий режим после холостого хода, так как различная длительность холостого хода обуславливает разные начальные условия нового цикла нагрева. Поэтому задача выхода из режима холостого хода с минимальным разбросом конечных температур и исключением брака при высоких скоростях нагрева представляет серьезные трудности.

В связи с небольшим опытом организации режимов струйного нагрева в металлургических печах этот процесс недостаточно изучен с теоретической точки зрения, поэтому при физико-математическом моделировании струйного нагрева исследователь сталкивается с такой особенностью, как необходимость учета конвективного теплообмена как основного. В [17] приведены разработка и реализация модели процесса струйного нагрева, в которой движение продуктов горения описано уравнениями вязкой несжимаемой жидкости Навье–Стокса, линеаризованных в приближении Буссинеска:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \beta \vec{g} T, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) T = \chi \Delta T, \\ \Delta \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (22)$$

где \vec{u} – скорость движения дымовых газов; ρ – средняя плотность продуктов горения; p – давление в печи; ν – кинематическая вязкость; \vec{g} – ускорение силы тяжести; β , χ – соответственно коэффициенты температурного расширения и теплопроводности; T – температура продуктов горения.

Данная система точных уравнений, описывающих во времени все детали эволюции поля скоростей и температуры в практической задаче, фактически не имеет аналитических решений. Численное решение интегральной задачи требует значительных вычислительных ресурсов. На практике существует следующий подход – решать уравнения осредненного движения, по которым определяется распределение осредненных по времени величин. Поэтому необходимо решать систему уравнений осредненного движения, которая содержит члены турбулентного переноса. Для замыкания системы уравнений эти члены должны быть аппроксимированы с помощью определенной модели турбулентности. Из теории турбулентных струй известно, что турбулентная вязкость на основном участке осесимметрической струи остается постоянной:

$$\frac{\nu_T}{u r_0} = 0,01 - 0,03, \quad (23)$$

где ν_T – коэффициент турбулентной вязкости (значение слабо изменяется по камере смешения); u – скорость в выходном сечении сопла; r_0 – радиус сопла.

Также для упрощения математической модели реальной физической вязкостью можно пренебречь, а эффективную вязкость принять равной турбулентной вязкости, так как ее значение на

несколько порядков превышает физическую вязкость.

В самом простейшем случае рассмотрения струйного обтекания цилиндра система уравнений (22) в двумерной постановке будет описываться следующей системой безразмерных уравнений в переменных ψ – функция тока; ω – завихренность:

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\omega) + \frac{\partial}{\partial y}(V\omega) = \frac{2}{Re} \Delta \omega + \frac{Gr}{2Re^2} \frac{\partial T}{\partial x}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(VT) = \frac{2}{Gr Re} \Delta T, \\ \Delta \psi = -\omega \end{cases} \quad (24)$$

Критерии подобия Re , Gr :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{DV_x}{\nu_T}, \\ Gr &= \frac{D^3 \beta \delta T g}{\nu_T^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

где D – диаметр цилиндра; V_x – характерная скорость; ν_T – турбулентная вязкость; $\delta T = T_1 - T_2$ – перепад температур; T_1, T_2 – температуры вдуваемого газа и заготовки.

Выводы

1. Выполнен анализ состояния газопечного оборудования в условиях машиностроительных предприятий на примере РУП «Минский автомобильный завод». Приведена методика расчета теплотехнических и технико-экономических показателей тепловой работы конкретной нагревательной печи, на основании которой определен удельный расход топлива, составляющий 154 м³/ч, к.п.д. – 15%.

2. Рассмотрены основные пути модернизации нагревательных и термических печей, включающие реконструкцию печного оборудования, совершенствование режимов тепловой обработки, организационные мероприятия. При этом потребление топливно-энергетических ресурсов в зависимости от состояния печей, технологического назначения, объема производства и т.д. может быть снижено в 1,3–1,9 раза, коэффициент полезного действия установок увеличен в 1,5–2,5 раза.

Литература

1. Тимошпольский В.И., Герман М.Л. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике // Литье и металлургия. 2007. №2. С. 21–28.
2. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей: Учеб. пособие для студентов вузов. Изд. 2-е. М.: Металлургия, 1982.
3. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 2/ В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Оль-

шанский; Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.

4. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Стеблов А.Б., Павлюченков И.А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского: Учеб. пособ. для студентов вузов. Мн.: Выш. шк., 1992.

5. Володин А.М., Яшкин А.В., Шахов И.И. Реконструкция нагревательных печей в кузнечно-прессовом цехе ОАО "Тяжпрессмаш" // Кузнечно-штамповочное производство. 2005. №3. С. 32–35.

6. Асцатуров В.Н., Пашистов М.А., Энно И.К. Топливные печи для нагрева металла в кузнечно-штамповочном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №10. С. 26–28.

7. Adler W., Gitzinger H.-P., Hatzfeld O., Bender W. High energy efficient reheating and heat treatment furnaces // Revue De Metallurgie (International ATS Steelmaking Conference). 2006. S. 210–211.

8. Парамонов А.М., Крайнов В.В. Определение оптимальной степени рекуперации теплоты уходящих дымовых газов // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. №4. С. 26–30.

9. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Усачев А.Б. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справ. изд. М.: Машиностроение-1, 2001. С. 28–41.

10. Богданов Э.Ф. Взаимосвязь теплотехнических показателей нагревательных печей // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. №10. С. 38–40.

11. Бровкин Л.А., Горбунов В.А., Крылова Л.С. Совершенствование организации работы нагревательных

печей в мелкосерийном и единичном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. 1991. №9. С. 27–28.

12. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой // Литье и металлургия. 2007. №2. С. 63–66.

13. Краснокутский П.Г., Кривандин В.А., Оляк В.Д., Безруков В.И. Определение допустимой интенсивности нагрева металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. №7. С. 115–119.

14. Маликов Г.К., Лисиенко В.Г., Маликов К.Ю., Лобанов Д.Л. Экспериментальное и теоретическое исследование скоростного струйно-факельного нагрева металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. №5. С. 68–71.

15. Кривандин В.А., Краснокутский П.Г. Интенсивность нагрева металла в печах с ударными струями // Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. №2. С. 99–103.

16. Скворцов А.А., Краснокутский П.Г., Смольков А.Н. Исследование режимов струйного нагрева заготовок из высокопрочного чугуна // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. №11. С. 125–128.

17. Энно И.К., Курносов В.В. Анализ особенностей скоростного струйного нагрева заготовок в кузнечных печах // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №10. С. 25–26.

18. Прибытков И.А., Кобахидзе В.В., Кривандин В.А. О задаче внешнего теплообмена при радиационно-струйном нагреве металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1998. №7. С. 62–66.

19. Прибытков И.А., Титова Г.В. Особенности струйного нагрева термически тонкого металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. №9–10. С. 51–54.