



*Analysis of the existing methods of estimation of efficiency of the fuel and energy resources using is carried out, on the basis of which the characteristics, allowing to make analysis of furnaces of different constructions operation, are formulated.*

Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 669.18

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ТОЛКАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОХОДНОГО ТИПА С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И УЛУЧШЕНИЯ ИХ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Согласно статистическим данным, в настоящее время средняя величина удельного расхода топлива в газопламенных печах кузнечного и заготовительного производства РУП «Минский автомобильный завод» достигает 250 кг у.т./т, что в 2–3 раза больше аналогичного показателя современных нагревательных устройств.

Учитывая, что основным видом топлива в нагревательных и термических печах машиностроительных предприятий, в том числе на РУП «МАЗ», является природный газ, стоимость которого постоянно возрастает, необходимо сократить его потребление до необходимого минимума. Для решения указанной проблемы на первом этапе следует определить фактический уровень потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на каждой печи, а затем с учетом состояния газогорелочных устройств и ограждающих конструкций, наличия систем автоматического управления и рекуперации теплоты уходящих газов сформулировать перечень реконструктивных мероприятий и установить нормы потребления ТЭР.

В связи с тем что модернизация печного парка на РУП «МАЗ» требует значительных капитальных затрат, необходимо предварительно оценить энергоэффективность различных технических решений с точки зрения расхода природного газа. Наиболее универсальным инструментом для решения указанной задачи является использование ряда энерготехнологических показателей, таких, как общий коэффициент полезного действия ( $\eta_{\text{общ}}$ ), коэффициент использования теплоты ( $\eta_{\text{и.т.}}$ ) и удельный расход условного топлива ( $b$ ). Вместе с тем в технической литературе [1–6] отсутствует единый подход к определению указанных коэффициентов.

Систематизация методик определения показателей [7], характеризующих эффективность тепловой работы пламенных печей, позволила сформулировать основные теплотехнические (энерготехнологические) показатели нагревательных устройств.

Общий коэффициент полезного действия печи (КПД):

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{усв.топл}}}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\% = \frac{Q_{\text{мет}} - (Q_{\text{экз}} - Q_{\text{ок}})}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

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

Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ):

$$\eta_{\text{и.т.}} = \frac{Q_{\text{х.топл}} + Q_{\text{физ}}^{\text{в}} - Q_{\text{ух}} - Q_{\text{недож}}}{Q_{\text{х.топл}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{х.топл}}$  – теплота от сжигания топлива, МВт (МДж/ч);  $Q_{\text{физ}}^{\text{в}}$  – теплота, вносимая с подогретым воздухом, МВт (МДж/ч);  $Q_{\text{ух}}$  – теплота, уносимая дымовыми газами на выходе из рабочего пространства печи, МВт (МДж/ч). В общем случае  $Q_{\text{ух}} = Q_{\text{д.г.}} + Q_{\text{подс}}$  ( $Q_{\text{подс}}$  – теплота, пошедшая на нагрев воздуха при подсосах);  $Q_{\text{недож}}$  – потери теплоты от механического недожога топлива, МВт (МДж/ч).

Удельный расход условного топлива (УРУТ):

$$b = \frac{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}}{29,3G_{\text{T}}}, \quad \frac{\text{кг у.т.}}{\text{т}}, \quad (3)$$

где  $B$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч или кг/ч;  $Q_H^P$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/м<sup>3</sup>;  $G_T$  – производительность печи, т/ч; 29,3 МДж/кг – теплота сгорания 1 кг условного топлива.

Приведенные показатели (1)–(3) использованы при оценке тепловой работы нагревательных печей, функционирующих в условиях РУП «МАЗ».

При проведении исследований использовали показания штатных приборов, установленных на печи: счетчиков-расходомеров и КИП, а также показания портативных приборов: газоанализатора, пирометра, тепловизионной камеры, секундомера. В процессе работы были взяты пробы окалины, на основании которых впоследствии с использованием метода планиметрирования была определена величина угара металла.

Исследования проводили на нагревательной проходной печи РУП «КЗТШ» (ГНП-1). Печь производительностью до 3 т/ч, длиной 6 м предназначена для нагрева цилиндрических заготовок под последующую штамповку. Заготовки укладывают одну за другой на направляющие (ручьи), соприкасаясь друг с другом торцовыми сторонами,

и толкают вдоль ручьев, двигаясь по которым, они проходят различные зоны нагрева от окна загрузки до окна выгрузки.

В результате теплотехнических исследований нагревательной печи были выполнены измерения следующих параметров: расход природного газа, темп выдачи заготовок на конвейер и их температура перед выдачей, температуры 1-й и 2-й зон печи, температура наружных поверхностей стен печи, температура воздуха после рекуператора, температура уходящих дымовых газов из печи, расход и температура оборотной воды, угар металла, химический состав дымовых газов, коэффициент избытка воздуха.

Исследования проходили при двух режимах работы печи (два и четыре ручья) при нагреве заготовок (диаметр 130 мм,  $L = 235$  мм, сталь 45). Производительность печи при работе в режиме четырех ручьев составила 2,8 т/ч, а при режиме двух ручьев – 2 т/ч. Средняя температура нагрева заготовок при выдаче из окна выгрузки составила 1270 °С.

На основании полученных данных для обоих режимов работы печи был выполнен теплотехни-

Т а б л и ц а 1. Тепловой баланс печи при работе в режиме четырех ручьев

Приход, МВт (%)		Расход, МВт (%)	
Химическая теплота сгорания топлива	2,982 (81,14)	Теплота, затраченная на нагрев металла	0,637 (17,33)
Теплота, вносимая подогретым воздухом	0,430 (11,7)	Тепловые потери с дымовыми газами	1,673 (45,52)
Теплота, выделяемая при окислении железа	0,263 (7,16)	Тепловые потери через кладку	0,03 (0,82)
		Тепловые потери излучением через открытые окна	0,324 (8,82)
		Тепловые потери с охлаждающей водой	0,001 (0,03)
		Тепловые потери с окалиной	0,082 (2,23)
		Неучтенные тепловые потери	0,036 (0,97)
		Тепловые потери, учитывающие подсосы воздуха	0,892 (24,28)
<b>ИТОГО</b>	<b>3,675 (100)</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>3,675 (100)</b>
$\eta_{\text{общ}} = 15,29\%$ ; $\eta_{\text{н.т.}} = 28,40\%$ ; $b = 131$ кг у.т./т			

Т а б л и ц а 2. Тепловой баланс печи при работе в режиме двух ручьев

Приход, МВт (%)		Расход, МВт (%)	
Химическая теплота сгорания топлива	2,211 (81,41)	Теплота, затраченная на нагрев металла	0,451 (16,61)
Теплота, вносимая подогретым воздухом	0,319 (11,74)	Тепловые потери с дымовыми газами	1,240 (45,66)
Теплота, выделяемая при окислении железа	0,186 (6,85)	Тепловые потери через кладку	0,030 (1,10)
		Тепловые потери излучением через открытые окна	0,324 (11,93)
		Тепловые потери с охлаждающей водой	0,001 (0,03)
		Тепловые потери с окалиной	0,058 (2,14)
		Неучтенные тепловые потери	0,036 (1,33)
		Тепловые потери, учитывающие подсосы воздуха	0,576 (21,20)
<b>ИТОГО</b>	<b>2,716 (100)</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>2,716 (100)</b>
$\eta_{\text{общ}} = 14,61\%$ ; $\eta_{\text{н.т.}} = 32,29\%$ ; $b = 138$ кг у.т./т			

ческий расчет и составлены тепловые балансы, по которым вычислены приведенные выше теплотехнические (энерготехнологические) показатели нагревательного устройства.

Результаты составления тепловых балансов представлены в табл. 1, 2.

Аналогичные исследования были выполнены для нагревательной печи № 40 РУП «МАЗ».

Печь предназначена для нагрева цилиндрических заготовок под последующую штамповку. Заготовки (диаметр 140 мм,  $L = 410$  мм, сталь 40Х) укладывают на плоскую подину одна за другой в 10 рядов при плоском соприкосновении друг с другом и толкают. При этом заготовки также проходят различные зоны нагрева от окна загрузки до окна выгрузки.

Производительность печи составила 2,4 т/ч. Средняя температура нагрева заготовок при выдаче из окна выгрузки составила 1110 °С. С использованием полученных данных был выполнен теплотехнический расчет, на основании которого вычислены теплотехнические показатели, характеризующие эффективность работы печи.

Сложность расчетов по конкретной печи заключалась в том, что на ней отсутствуют датчики расхода природного газа, давления, температур, что является характерным для подавляющего большинства функционирующих печей на РУП «МАЗ».

Так как печь работает при постоянно открытых окнах загрузки и выгрузки, то при расчете теплового баланса нагревательных печей [3] следует учитывать подсосы холодного воздуха. Количество холодного воздуха, подсасываемого в печь, нагреваемого до температуры уходящих дымовых газов и покидающего печь с дымовыми газами, можно определить с помощью газоанализатора по количеству кислорода, содержащегося в дымовых газах:

$$n_d = \frac{1}{1 - A/21}, \quad (4)$$

где  $A$  – количество кислорода в уходящих газах согласно показаниям газоанализатора, %:

$$V_{\text{подс}} = (n_d - n)I_B^0; \quad (5)$$

$$V_{\text{ух}} = V_{\text{д.г.}} + V_{\text{подс}}. \quad (6)$$

Дополнительная расходная статья теплового баланса:

$$Q_{\text{подс}} = BV_{\text{подс}}i_B^{\bar{t}_d}, \quad (7)$$

где  $i_B^{\bar{t}_d}$  – энтальпия подсасываемого воздуха, нагреваемого до температуры  $\bar{t}_d$ .

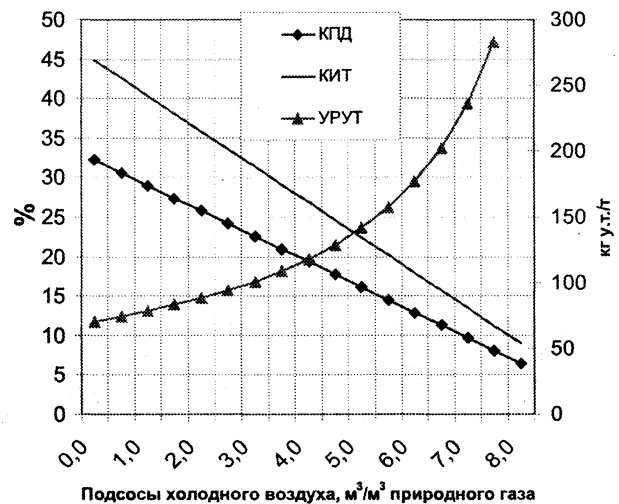


Рис. 1. Зависимость теплотехнических показателей работы печи от подсосов холодного воздуха

С учетом подсосов холодного воздуха расход природного газа рассчитаем по формуле

$$B = \frac{0,598}{15,009 - 1,5V_{\text{подс}}}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (8)$$

По результатам экспериментальных и теоретических исследований выполнены расчеты основных теплотехнических показателей работы печи в зависимости от количества холодного воздуха, попавшего в рабочее пространство через открытые окна загрузки и выгрузки из расчета на 1 м³ природного газа (рис. 1).

Из рисунка видно, что удельный расход условного топлива на уровне 200–250 кг у.т./т (соответствует среднему показателю для нагревательных печей РУП «МАЗ») и КПД печи 7–12% достигаются в том случае, если в печь, помимо воздуха горения, дополнительно попадает около 6,5–7,5 м³ холодного воздуха на 1 м³ топлива.

В обеих исследованных печах не соблюдается температурный режим нагрева заготовок, а значительная доля тепловых потерь, обусловленная подсосами холодного воздуха через открытые окна печи, приводит к перерасходу топлива. Это также приводит к перегреву поверхности заготовок, интенсивному окислению металла (рис. 2), подплавлению образующейся окалины (при температуре более 1260–1270 °С) и свариванию торцов заготовок (рис. 3).

Таким образом, при проектировании рассмотренных нагревательных печей были допущены определенные ошибки, связанные с технологической организацией загрузки-выгрузки заготовок, организацией гидравлического и температурного режима в печи и др.

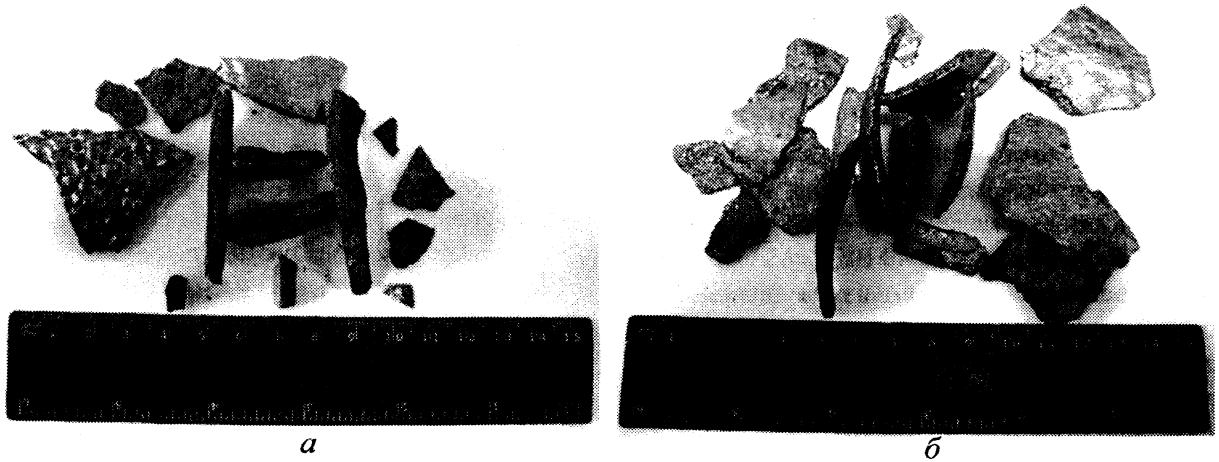


Рис. 2 Средние по толщине куски окалины: *а* – первая исследованная печь; *б* – вторая исследованная печь

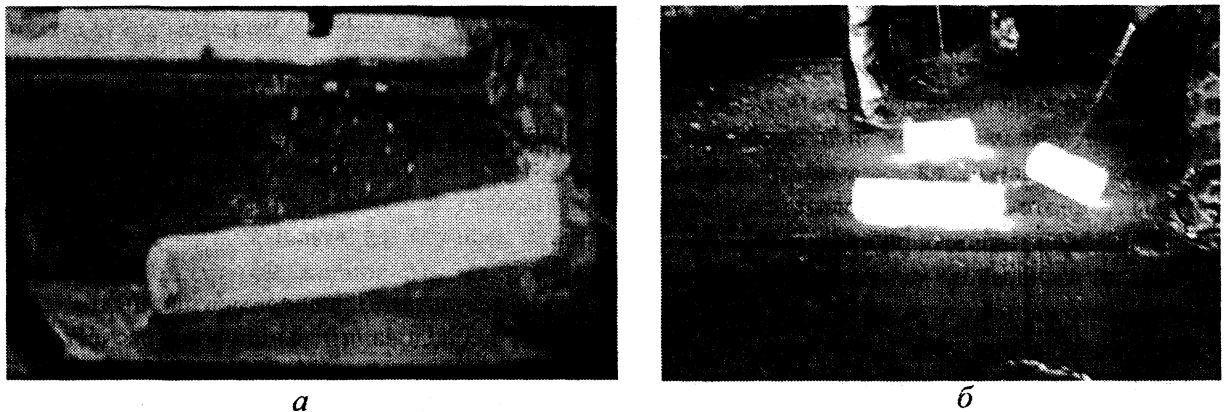


Рис. 3 Сваривание четырех заготовок при работе первой исследованной печи: *а* – в зоне выдачи; *б* – разделение перед штамповкой

Создание нового оборудования и технологий в настоящее время практически невозможно без использования компьютерной техники и методов математического моделирования. Фактически на первой стадии проектирования описывается виртуальный объект, который является копией проектируемого, и на его базе отрабатываются различные варианты технических и технологических решений. В области промышленного печестроения процесс строительства новой печи, как правило, предполагает разработку модели нагревательного устройства, достаточно подробно учитывающей геометрию рабочего пространства, состав футеровочных материалов, тип и расположение горелочных устройств, форму и свойства нагреваемых изделий [8], характер движения дымовых газов и т.д.

Перечисленным требованиям удовлетворяют математические модели теплообмена, позволяющие совместно решать задачи о переносе теплоты во внешней среде и нагреваемом теле. Это позволяет минимизировать влияние на точность результатов субъективного фактора, которое заключается, например, в задании условий теплоотдачи на

поверхности тела при расчете поля температур. Следует отметить, что значение коэффициента лучистого теплообмена зависит от степени черноты поверхностей, участвующих в процессе, которые в свою очередь могут изменяться с температурой. Интенсивность теплообмена конвекцией зависит от скорости движения и свойств печной среды. Все указанные параметры определяются теплофизическими и оптическими свойствами футеровочных и нагреваемых материалов, геометрией рабочего пространства, режимом работы и типом горелок, видом используемого топлива и количеством воздуха (окислителя), который подается на горение, т.е. конструктивными и технологическими параметрами.

Анализ существующих методов расчета, применяемых для определения характеристик тепловой работы газопламенных печей, показывает, что в случае необходимости оптимизации конструктивных элементов оборудования или применяемой технологии необходимо использовать достаточно сложный математический аппарат, позволяющий варьировать геометрическими и техническими па-

раметрами агрегата и отдельных его частей, а также технологическими параметрами. Опыт исследований тепловой работы нагревательных устройств показывает, что данным требованиям удовлетворяет математическая модель сопряженного теплообмена.

При расчете и конструировании современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металлических изделий и заготовок следует учитывать все существующие технические решения, позволяющие в комплексе эффективно устранить большинство выявленных недостатков.

Наиболее эффективными теплотехническими факторами являются [9, 10]:

- рекуперация теплоты уходящих газов (увеличивает КПД на 15–22%);
- использование современных газогорелочных устройств (увеличивает КПД на 6–8%);
- снижение потерь теплоты через ограждения печи и на аккумуляцию теплоты кладкой (увеличивает КПД на 4–6%);
- автоматизация теплового режима работы печи (экономия топлива до 15%).

Реализация изложенных выше принципов была заложена при создании конструкции и технологической схемы нагревательной печи ПВП-1 [11] и проходной газовой печи ПНП-300, разработанной для РУП «МАЗ» [12].

### Выводы

1. Выполнен анализ существующих методов оценки эффективности использования ТЭР в пламенных печах, на основании которого сформулированы характеристики, позволяющие сделать сравнительный анализ работы печей различной конструкции.

2. Проведены балансовые теплотехнические испытания и с использованием разработанного Типового положения [7] определены энерготехнологические показатели нагревательных печей РУП «МАЗ».

3. Сформулированы основные рекомендации, направленные на устранение конструктивных и технологических недостатков рассмотренных печей, которые были выявлены в процессе исследований.

### Литература

1. Мельниченко Е. Ф., Немзер Г. Г., Энно И. К. Пути экономии топлива в пламенных печах. М.: Машиностроение, 1989.
2. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. / С. Б. Василькова, М. М. Генкина, В. Л. Гусовский и др. / Под ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского. М.: Metallurgy, 1983.
3. Metallurgical furnaces. Theory and calculations: В 2-х т. / В. И. Губинский, В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский и др. / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
4. Казанцев Е. И. Промышленные печи (справ. руководство для расчетов и проектирования). М.: Metallurgy, 1975.
5. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Мн.: Высш. шк., 1992.
6. Тимошпольский В. И., Несенчук А. П., Трусова И. А. Промышленные теплотехнологии: Методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и металлургического производства: Учеб. в 5-ти ч. Ч. 3. Мн.: Высш. шк., 1995.
7. Типовое положение по расчету теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного и термического производства ПО «МАЗ». БНТУ, 2008.
8. Тимошпольский В. И., Трусова И. А. К расчету нагрева массивного металла в пламенных печах // Изв. вузов. Энергетика. 1985. № 1. С. 103–106.
9. Тимошпольский В. И., Несенчук А. П., Трусова И. А., Менделев Д. В., Герман М. Л. Расчет и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла // Изв. высш. учеб. завед. и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2008. № 4. С. 34–43.
10. Герман М. Л., Тимошпольский В. И., Менделев Д. В. Выбор технических решений при модернизации парка нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий // Тез. докл. XV Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии». 2008. С. 37–38.
11. Пат. ВУ, МПК F 27B 3/00, F 27B 9/00, F 27B 13/00. Печь с выкатным подом / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман.
12. Пат. ВУ 20.11.2008, МПК F 27B 3/00, F 27B 9/00, F 27B 13/00. Конструкция проходной газовой печи / М. Л. Герман, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. В. Менделев и др.