

9. Kirschen, M. Off-gas measurements for mass and energy balances of a stainless steel EAF / M. Kirschen, H. Pfeifer, F.-J. Wahlers, H. Mees // Proc. 59. Electric Furnace Conf., 11–14 Nov 2001, Arizona, USA. – P. 737–745.

10. Pfeifer, H. Improved EAF Process Control Using On-Line Offgas Analysis – OFFGAS / H. Pfeifer, T. Echterhof // Final report EUR 25048 EN Contract No RFSR-CT-2006-00004, European Union, 2011. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. – 168 p.

УДК 620.9

**С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ, канд. техн. наук,
Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук,
А.С. МАСКАЛЬЧУК (БНТУ)**

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И СРОКОВ ОКУПАЕМОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТИПА ДЕЙСТВИЯ*

На белорусских промышленных предприятиях функционирует более 1500 нагревательных и термических печей сопротивления (свыше 90 % из них это печи периодического действия – шахтные и камерные). По результатам инвентаризации [1] средний срок эксплуатации печей сопротивления составляет 37 лет, и за этот период их конструкции физически и морально устарели. Повышение энергоэффективности данных установок можно обеспечить за счет реализации различных организационных и конструктивных мероприятий:

- 1) оптимизации производственного процесса (например, путем увеличения коэффициента загрузки оборудования);
- 2) совершенствования режимов тепловой и термической обработки;
- 3) создания современных (модернизация существующих) конструкций печного оборудования.

Третье направление, на наш взгляд, более перспективное, так как внедрение нового оборудования с футеровкой из волокнистых материалов и современных жаропрочных бетонов позволяет без дополнительных мер сократить простои за счет более высокой скорости выхода печи на рабочий режим, снизить длительность цикла термообработки, повысить производительность агрегата и т.д.

Помимо замены футеровки для повышения энергоэффективности новых печей сопротивления, как правило, используются нагревательные элементы из современных материалов и сплавов, что обеспечивает увеличение межремонтного периода и снижение отрицательного эффекта изменения свойств нагревательных элементов в процессе работы. Весьма важным аспектом модернизации производства и печного оборудования, в частности, является применение современных систем АСУ ТП.

Так как наибольший эффект с точки зрения энергопотребления обеспечивается путем уменьшения непроизводственных тепловых потерь, рассмотрим более подробно вопрос экономической эффективности такого метода модернизации, как замена футеровки.

Известно, что теплота, подводимая к футеровке со стороны рабочего пространства печи, частично аккумулируется кладкой при работе в нестационарном режиме и расходуется на компенсацию тепловых потерь теплопроводностью в окружающую среду. Согласно имеющимся литературным данным [2–4] в камерных электрических печах доля таких потерь составляет от 14 до 41 %. При увеличении толщины футеровки потери теплоты теплопроводностью снижаются, но возрастает количество теплоты, аккумулируемое кладкой, капитальные затраты на ограждающие конструкции печи, а также эксплуатационные расходы. Поэтому актуальным является решение задачи выбора оптимальных параметров футеровки с точки зрения ее теплофизических, эксплуатационных и стоимостных характеристик.

Для оценки экономической эффективности любой модернизации необходимо сопоставить существующий уровень затрат и дополнительную выгоду, которую предприятие может получить при использовании нового (модернизированного) оборудования. В настоящей статье произведена оценка энергоэффективности замены футеровки в камерных и шахтных печах сопротивления на примере СНЗ-8.16.5/10М1 (ОАО «БелАЗ»), Ц105 и Ш-70 (ОАО «МАЗ»). В

качестве исходных данных при расчетах принимались паспортные характеристики печного оборудования и информация, предоставленная заводскими специалистами. На первом этапе выполнялись расчеты тепловых балансов указанных печей.

Исходными данными для этих расчетов были: начальная температура деталей и корзин перед закалкой – 20 °С, марка стали деталей – 40Х, марка материала корзин – сталь 3, размеры деталей: $\varnothing 490 \times \varnothing_{\text{отв}} 320 \times 140$ мм и корзин $\varnothing 500 \times 300$ мм, масса одной детали 119 кг и корзины 45 кг, количество деталей и корзин в садке – 2 шт. Рассматривался наиболее часто используемый на предприятии режим нагрева перед закалкой: время нагрева деталей – 130 мин, температура нагрева деталей 840 °С, время выдержки деталей – 85 мин. В процессе расчетов также учитывались потери теплоты излучением во время выгрузки нагретой садки и загрузки новой (время загрузки одной корзины с деталями – 2–3 мин, время выгрузки одной корзины с деталями – 2–3 мин).

Согласно производственным данным и рекомендациям, изложенным в технической литературе [2, 4], средняя мощность (расход теплоты) в период нагрева должна определяться с учетом возможных колебаний напряжения в сети и изменения сопротивления нагревателей в процессе работы. Для камерных электропечей типа СЗН (СНО) в практических расчетах коэффициент, позволяющий учесть данные факторы, принимаем равным $K = 1,5$ [2, 4].

Тогда мощность периода нагрева составит:

$$N_{\text{нагр}} = P_{\text{уст}} / K = 81 / 1,5 = 54 \text{ кВт},$$

где $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность печи, кВт.

Тепловой расчет основан на рассмотрении теплового баланса за один цикл работы печи:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}},$$

где $Q_{\text{н}}$ – количество теплоты, выделенного нагревательными элементами за цикл; $Q_{\text{м}}$ – полезная теплота, идущая на нагрев изделия; $Q_{\text{в}}$ – вспомогательная теплота, идущая на нагрев жароупорных поддонов и защитной атмосферы (если применяется); $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери за цикл.

Так как режим работы печи по причине незначительной продолжительности периода выгрузки-загрузки по сравнению с общим временем цикла позволяет считать тепловое состояние ограждающих конструкций квазистационарным, потери с внешней поверхности рассчитаем согласно формуле:

$$Q_{п.с} = \alpha \cdot (t_c - t_{o,c}) \cdot F_c,$$

где $t_c, t_{o,c}$ – температура наружной поверхности стенки и окружающей среды соответственно, °С; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности стен (Вт/(м²·град)) (значения α принимаем в соответствии с рекомендациями [4]); F_c – площадь стен печи, м².

При температуре стенки 100 °С (согласно информации завода) $\alpha = 14,5$ Вт/(м²·К), для свода при температуре около 150 °С $\alpha = 17,4 \cdot 1,3 = 22,6$ Вт/(м²·К) (с учетом того, что для горизонтальных поверхностей, обращенных вверх α увеличивается \approx на 30 %); для пода при температуре 150 °С $\alpha = 17,4 \cdot 0,7 = 12,18$ Вт/(м²·К) (с учетом того, что для горизонтальных поверхностей, обращенных вниз α уменьшается \approx на 30 %).

Информация о существующей конструкции футеровки печи приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика футеровки печи СНЗ-8.16.5/10М1 (ОАО «БелАЗ»)

Элемент конструкции Слой футеровки	Крышка	Стены	Подина
1-й слой: материал толщина	ШЛ-0,4 № 5 65 мм	ШЛ-0,4 № 5 65 мм	ШЛ-0,4 № 5 65 мм
2-й слой: материал толщина	ШПД-39 № 2 75 мм	ШПД-39 № 2 75 мм	ШПД-39 № 2 75 мм
3-й слой: материал толщина	ШПД-39 № 2 150 мм	ШПД-39 № 2 75 мм	ШПД-39 № 2 (торцом) 150 мм

Эскиз элементов ограждающих конструкций печи приведен на рисунке 1.

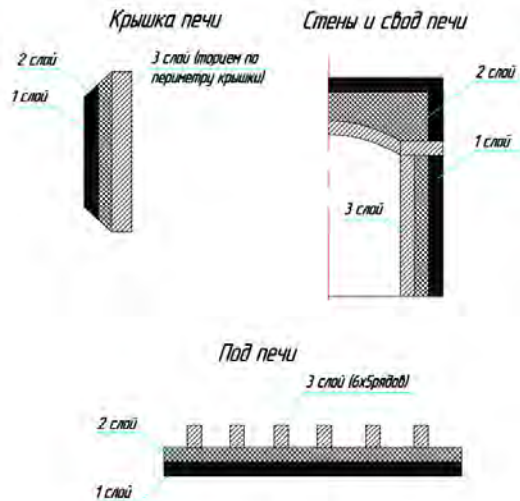


Рисунок 1 – Существующая футеровка печи CH3 (CHO)

В соответствии с результатами, полученными при измерении температуры поверхностей печи, реальные потери в окружающую среду равны:

– потери через стены:

$$Q_{п.с} = 14,5 \cdot (100 - 20) \cdot 7,042 = 8168 \text{ Вт} = 8,17 \text{ кВт};$$

– потери через свод печи:

$$Q_{п.к} = 22,6 \cdot (150 - 20) \cdot 2,5 = 7342 \text{ Вт} = 7,34 \text{ кВт};$$

– потери через под:

$$Q_{п.п} = 12,18 \cdot (150 - 20) \cdot 2,5 = 3954 \text{ Вт} = 3,95 \text{ кВт}.$$

При использовании волокнистой футеровки температура поверхности стенок и свода будет равна 45 °С, при этом $\alpha_c = 8,63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_{св} = 11,22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Футеровка пода будет представлять собой двухслойную конструкцию из жаропрочного пористого бетона IZOBET 1150/1,2 (300 мм) и кальций-силикатных плит KERASIL (75 мм). Температура на внешней поверхности согласно расчетам не превысит 70 °С. Потери через стены, свод и под печи с новой футеровкой составят:

$$Q_{п.с} = 1,52 \text{ кВт}; Q_{п.к} = 0,7 \text{ кВт}; Q_{п.п} = 0,88 \text{ кВт}.$$

При выгрузке и загрузке садки часть теплоты теряется излучением через открытое окно печи, мощность потерь рассчитывают по закону Стефана–Больцмана:

$$Q_{изл} = 5,76 \cdot \varepsilon \cdot [(T_{п}/100)^4 - (T_0/100)^4] \cdot F_0 \cdot \psi,$$

где ε – степень черноты отверстия печи, для малых отверстий $\varepsilon \approx 1$, для больших – 0,8; $T_{п}$, T_0 – абсолютная температура соответственно рабочей камеры печи и окружающего воздуха, К; F_0 – площадь отверстия для загрузки печи; $\psi = 0,2$ –0,8 – коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину отверстия и экранизирующее действие его стенок (для СНЗ $\psi \approx 0,7$).

Печь за время выгрузки-загрузки остывает \approx на 100 °С.

Тогда после открытия печи потери излучением будут равны

$$Q_{изл}^{(1)} = 5,76 \cdot 0,8 \cdot [(1173/100)^4 - (293/100)^4] \cdot 0,4 = 23,95 \text{ кВт}.$$

Перед закрытием печи (температура уменьшается с 900 до 800 °С) плотность потока составит:

$$Q_{изл}^{(2)} = 5,76 \cdot 0,8 \cdot [(1073/100)^4 - (293/100)^4] \cdot 0,4 = 17,01 \text{ кВт}.$$

Среднее логарифмическое потерь излучением составит:

$$Q_{изл}^{ср} = (23,95 - 17,01)/\ln(23,95/17,01) = 20,28 \text{ кВт}.$$

Величина затрат теплоты, аккумулированной кладкой при выходе печи на рабочий режим после загрузки, численно будет равна потерям излучением. Так как продолжительность периода выгрузки-загрузки составляет около 6 мин (0,1 ч), то затраты электроэнергии на разогрев кладки до рабочей температуры составят:

$$C_{акк} = 20,28 \cdot 0,1 = 2,03 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

С учетом того, что средняя потребляемая печью мощность в период нагрева составляет 54 кВт, а потери на короткие тепловые за-

мыкания $Q_{к.з}$ в соответствии с рекомендациями, представленными в технической литературе [2, 4], принимаются в диапазоне от 50 до 150 % потерь через стены печи (принимается 120 %), мощность, израсходованная на нагрев садки и приспособлений (корзин) будет равна:

$$Q_M^{\text{наг}} = 54 - (8,17 + 7,34 + 3,95) - 8,17 \cdot 1,2 = 23,8 \text{ кВт.}$$

Среднюю мощность, расходуемую на нагрев металла и приспособлений, можно представить в виде:

$$Q_M^{\text{наг}} = \frac{M_{с+пр}}{\tau} \Delta i ,$$

где $M_{с+пр}$ – масса садки и приспособлений, кг; Δi – изменение энтальпии садки за период нагрева (выдержки), кДж/кг; τ – продолжительность периода термообработки, с.

Тогда

$$\Delta i = 23,8 \frac{2,17 \cdot 3600}{328} = 565,92 \text{ кДж/кг}$$

Данное значение энтальпии соответствует ≈ 820 °С. Следовательно, за период выдержки металл садки и приспособлений должен нагреться до 860 °С, а его теплосодержание достигнет $\approx 597,1$ кДж/кг.

Таким образом, средняя мощность на нагрев садки и приспособлений в течение периода выдержки составит:

$$Q_M^{\text{выд}} = \frac{328}{1,417 \cdot 3600} (597,1 - 565,92) = 2,76 \text{ кВт.}$$

Так как мгновенные потери через ограждающие конструкции во время выдержки практически равны потерям на стадии нагрева с учетом квазистационарности теплового состояния футеровки [2], определим мощность печи в течение данного периода:

$$N_{\text{выд}} = Q_M^{\text{выд}} + \sum Q_{\text{пот}} ,$$

$$N_{\text{выд}} = 2,76 + (8,17 + 7,34 + 3,95) + 1,2 \cdot 8,17 = 30,39 \text{ кВт.}$$

Для определения затрат электроэнергии за один цикл работы печи необходимо умножить среднюю мощность печи на продолжительность периода в часах (нагрев – 2,17 ч; выдержка – 1,417 ч).

В соответствии с представленной методикой были выполнены расчеты тепловых балансов печи СНЗ для следующего варианта нагрева под закалку других деталей: марка стали деталей 20ГЛ, материал приспособления Ст3, габаритные размеры деталей 952×360×202 мм и приспособления 1120×540×180 мм, масса одной детали 102,4 кг и приспособления 305 кг, количество деталей и приспособлений в садке – 1 шт. Режим термообработки: время нагрева деталей – 120 мин, температура нагрева деталей 900 °С, время выдержки деталей – 100–120 мин, время загрузки приспособления с деталями 2–3 мин, время выгрузки приспособления с деталями 2–3 мин).

Результаты расчетов сведем в сводные таблицы тепловых балансов (таблицы 2–5).

Таблица 2 –Тепловой баланс печи за период нагрева садки (деталь № 1/деталь № 2) (существующая конструкция футеровки)

Приход теплоты				Расход теплоты		
Статья	кВт	%	кВт·ч	Статья	кВт·ч	%
1. Теплота от нагревательных элементов	54,0	100,0	117,0	1. Теплота на нагрев металла	37,41	31,98
	54,0		108,0		11,92	11,04
				2. Теплота на нагрев тары	14,15	12,09
					35,52	32,88
				3. Тепловые короткие замыкания	21,24	18,15
					19,6	18,15
				4. Теплота, аккумулярованная футеровкой	2,03	1,73
	2,03	1,88				
				5. Потери через футеровку	42,17	36,04
					38,93	36,04
ВСЕГО:	54,0	100,0	117,0 108,0	ВСЕГО:	117,0 108,0	100,0

Таблица 3 – Тепловой баланс печи за период выдержки
(деталь № 1/деталь № 2) (существующая конструкция футеровки)

Приход теплоты				Расход теплоты		
Статья	кВт	%	кВт·ч	Статья	кВт·ч	%
1. Теплота от нагревательных элементов	30,39	100,0	43,05	1. Теплота на нагрев металла	2,83	6,58
	39,5		79,01		5,97	7,55
				2. Теплота на нагрев тары	1,07	2,49
					17,77	22,5
				3. Тепловые короткие замыкания	11,57	26,88
					16,34	20,68
				4. Теплота, аккумулированная футеровкой	0,00	0,00
				5. Потери через футеровку	27,57	64,05
					38,93	49,27
ВСЕГО:	30,39	100,0	43,05	ВСЕГО:	43,05	100,0
	39,5		79,01		79,01	

Таблица 4 – Тепловой баланс печи за период нагрева
(деталь № 1/деталь № 2) (новая футеровка)

Приход теплоты				Расход теплоты		
Статья	кВт	%	кВт·ч	Статья	кВт·ч	%
1. Теплота от нагревательных элементов	37,67	100,0	81,61	1. Теплота на нагрев металла	37,46	45,90
			75,33		11,94	15,85
				2. Теплота на нагрев тары	14,17	17,36
					35,56	47,2
				3. Тепловые короткие замыкания	21,24	26,02
					19,6	26,02
				4. Теплота, аккумулированная футеровкой	2,03	2,49
					2,03	2,69
				5. Потери через футеровку	6,72	8,24
					6,2	8,24
				ВСЕГО	37,67	100,0
		75,33	75,33			

Таблица 5 – Тепловой баланс печи за период выдержки (деталь № 1/деталь № 2) (новая футеровка)

Приход теплоты				Расход теплоты		
Статья	кВт	%	кВт·ч	Статья	кВт·ч	%
1. Теплота от нагревательных элементов	12,56	100,0	20,7	1. Теплота на нагрев металла	2,78	13,42
	23,11		46,23		5,95	12,88
				2. Теплота на нагрев тары	1,96	9,46
					17,73	38,36
				3. Тепловые короткие замыкания	11,57	55,9
					16,34	35,34
				4. Теплота, аккумулярованная футеровкой	0,00	0,00
				5. Потери через футеровку	4,39	21,2
					6,2	13,42
ВСЕГО	12,56 23,11	100,0	20,7 46,23	ВСЕГО	20,7 46,23	100,0

Ниже приведены расчеты экономического эффекта от модернизации печи СНЗ (таблица 6). В качестве исходных данных принимались средние значения продолжительности цикла и потребления электроэнергии.

Таблица 6 – Экономическая эффективность предполагаемой модернизации печи СНЗ–8.16.5/10М1 (ОАО «БелАЗ»)

Экономия потребляемой электроэнергии за один цикл	Показатели		Сумма, долл. США
	1	2	
Деталь № 1	60,65	кВт·ч	4
Деталь № 2	65,45	кВт·ч	
Средняя продолжительность цикла (нагрев + выдержка + загрузка – выгрузка)	3,79	ч	
Количество циклов за месяц	139,25		
за год	1671,03		
Средняя экономия (по двум деталям)	63,05	кВт·ч	

Окончание таблицы 6

1	2	3	4
Экономия за год	105359,08	кВт·ч	14750,27
Снижение заявленной мощности на 21 кВт при тарифе 130 тыс. руб./кВт			2794,355
Экономия на разогревах печи от 300 °С до стационарного состояния (52 раза за год)			1223,355
Затраты со старой футеровкой	424,69	кВт·ч	3091,754
с волокнистой футеровкой	256,65	кВт·ч	1868,398
Суммарная экономия от модернизации:			18767,98
Сумма инвестиций			28000,0
Амортизационные отчисления			2800
Срок окупаемости			1,35 года

Аналогичные расчеты были произведены для шахтных печей Ц105 и Ш70 ОАО МАЗ. Результаты расчетов технико-экономических показателей от замены футеровки приведены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Расчет экономии от модернизации печи Ц105 (ОАО «МАЗ»)

Экономия потребляемой электроэнергии за один цикл	Показатели		Сумма, долл. США
	2	3	
1	2	3	4
ШКВОРЕНЬ	195,48	кВт·ч	
ШЕСТЕРНЯ	211,06	кВт·ч	
Средняя продолжительность цикла (нагрев + выдержка + загрузка – выгрузка)	13,00	ч	
Количество циклов за месяц	49,85		
за год	598,15		
Средняя экономия (по двум деталям Шкворень и Шестерня)	203,27	кВт·ч	
Экономия за год	121585,10	кВт·ч	17021,91
Снижение заявленной мощности на 25 кВт при тарифе 110 тыс. руб./кВт			3326,613
Экономия на разогревах печи до стационарного состояния (12 раз за год)			259,3375

Окончание таблицы 7

1	2	3	4
Затраты со старой футеровкой	628,44	кВт·ч	1055,777
с волокнистой футеровкой	474,07	кВт·ч	796,4398
Суммарная экономия от модернизации:			20607,86
Сумма инвестиций			37000,0
Амортизационные отчисления			3700
Срок окупаемости	1,52 года		

Таблица 8 – Экономические показатели модернизации печи Ш-70

	Экономия за один цикл	
Вал стабилизатора (1 цикл – 2,25 ч)	51,54 кВт·ч	89 циклов в месяц
Стремянка (1 цикл – 3,73 ч)	84,63 кВт·ч	13 циклов в месяц
Полуось (1 цикл – 2,95 ч)	70,72 кВт·ч	40 циклов в месяц
Действительный фонд рабочего времени печи в месяц	486,67 ч	
Действительный фонд рабочего времени печи в месяц по трем деталям	366,74 ч (загрузка печи ~ 75 %)	
Годовая экономия		
Вал стабилизатора	55044,72 кВт·ч	
Стремянка	13202,28 кВт·ч	
Полуось	33945,6 кВт·ч	
ВСЕГО	102192,6 кВт·ч	14306,96 долл. США
Снижение заявленной мощности печи на 23 кВт при тарифе 110 тыс. руб. за 1 кВт		3060,47 долл. США
Экономия на разогревах печи до стационарного состояния (61 раз в год)	19873,8 кВт·ч	2782,3 долл. США
Затраты со старой футеровкой (1 разогрев)	421,4 кВт·ч	
Затраты с новой футеровкой (1 разогрев)	95,6 кВт·ч	
Суммарная экономия от модернизации (при загрузке печи – 75 %)		20149,7 долл. США
Сумма инвестиций		35000 долл. США
Амортизационные отчисления		3500 долл. США
Срок окупаемости		1,48 года

В статье выполнены расчеты экономии энергоресурсов и экономической эффективности для конкретных шахтных печей сопро-

тивления, функционирующих в условиях ОАО «МАЗ» и ОАО «БелАЗ» при модернизации футеровок. Полученные результаты показали, что при учете реальной стоимости модернизации и расчетной величины экономии энергоресурсов срок окупаемости таких печей составляет от 1,35 до 1,52 лет. В случае, если предприятие будет пользоваться кредитными ресурсами для модернизации печного парка эти цифры возрастут в 1,3–1,5 раз в зависимости от ставки банка и срока кредита.

Литература

1. **Гринчук, П.С.** Модернизация парка промышленных печей / П.С. Гринчук, А.М. Русецкий // Наука и инновации. – 2010. – № 12 (94). – С.74–76.

2. **Свенчанский, А.Д.** Электрические промышленные печи: в 2-х ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский // – М.: Энергия. –1975. – 384 с.

3. **Электротермическое оборудование:** Справочник / Под общ. ред. А.П. Альтгаузена, М.Я. Смелянского, М.С. Шевцова. – М.: Энергия. – 1967. – 488 с.

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

УДК 621.783:519

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛОЗАВАЛКЕ*

Введение. При моделировании подогрева металлошихты в установках различного типа одним из важных вопросов является адекватность используемой физико-математической модели реальным условиям процесса. Одной из проблем является расчет внутреннего