

Список использованных источников

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Изд. 3, переработанное и дополненное: учеб. пособ. для металлург. специальностей вузов / Под общ. ред. канд. техн. наук А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.

2. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи «Машиностроение» / Б.Ф. Зобнин. – М., 1964. – 311 с.

УДК 621.783+669.3.055

А. Д. Романова, М. Д. Казяев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА АККУМУЛЯЦИИ ТЕПЛОТЫ ФУТЕРОВКОЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. В последнее время актуализировались вопросы, связанные с расчетом аккумуляции теплоты футеровкой как из кирпичных материалов, так и керамо-волоконистых блоков и матов. Предметом исследования являются вертикальные термические печи № 22 и № 23 УЗТМ. Данные печи предназначены для термической обработки машиностроительной продукции, а именно, крупных поковок (роторов турбин, валков прокатных станов).

Целью работы является изучение и применение методики В.Ф. Ратникова к вертикальным термическим печам № 22 и № 23 УЗТМ.

Ключевые слова: вертикальная термическая печь, температурный режим, тепловой баланс, кирпичная футеровка печи, аккумуляция теплоты футеровкой, циклическое равновесие кладки.

Abstract. Recently, issues related to the calculation of heat accumulation by lining both from brick materials and ceramic-fiber blocks and mats have been updated. The subject of the study are vertical thermal furnaces № 22 and № 23 UZTM. These furnaces are designed for heat treatment of machine-building products, namely, large forgings (turbine rotors, rolls of rolling mills).

The purpose of the work is to study and apply the methodology of V.F. Ratnikov to vertical thermal furnaces № 22 and № 23 UZTM.

Key words: vertical thermal furnace, temperature regime, thermal balance, brick lining of the furnace, heat accumulation by lining, cyclic equilibrium of masonry.

В машиностроении широко используют вертикальные печи для термической обработки крупных поковок (роторов турбин, валков прокатных станов).

Конструктивной особенностью геометрии рабочего пространства является высота, которая может достигать 20 метров и более.

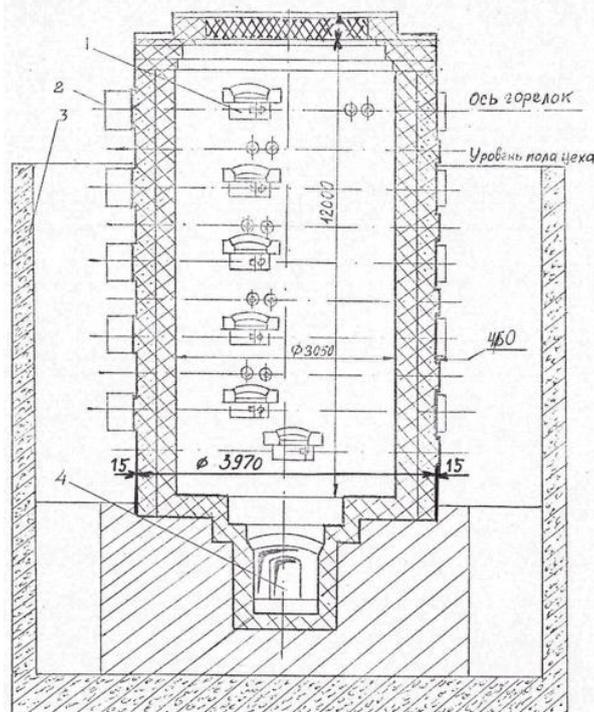
Другой особенностью вертикальных термических печей является сложный многоступенчатый температурный режим, который состоит из нескольких температурных подъемов, чередующихся с выдержкой [1].

В качестве аналога рассматривается вертикальная термическая печь с традиционной кирпичной футеровкой № 23 УЗТМ (рисунок 1). В данной печи был

экспериментально нагрет ротор турбины $m=37,18$ т, по сложному температурному режиму (рисунок 2).

Нагрев производился в два этапа:

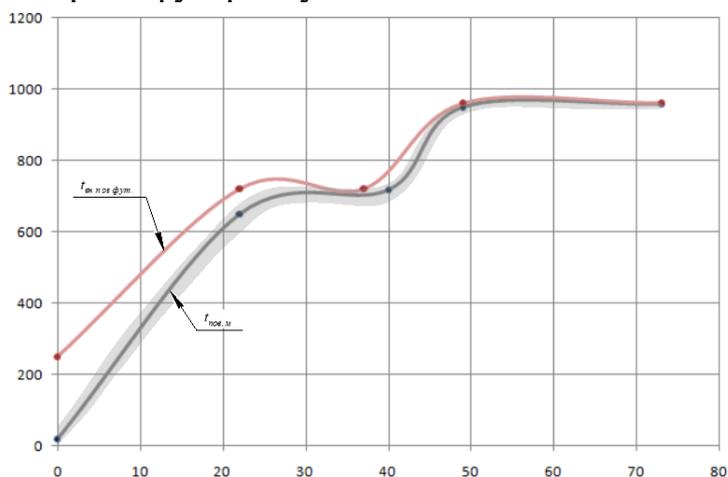
1. Подъем $t_{\text{пов.фут}}$ от 250 °С до 720 °С и выдержки при температуре 720 °С;
2. Подъем $t_{\text{пов.фут}}$ от 720 °С до 960 °С и выдержки при температуре 960 °С;



- 1 – горелка; 2 – площадки обслуживания горелок; 3 – бетонный кессон;
4 – канал для отвода продуктов сгорания; 5 – крышка

Рис. 1. Продольный разрез вертикальной термической печи № 23 УЗТМ с кирпичной футеровкой

Для того чтобы выявить степень равномерности нагрева заготовки были установлены термопары в футеровку печи.



- t_1 – температура поверхности заготовки, t_2 – температура внутренней поверхности футеровки

Рис. 2. Температурный режим вертикальной термической печи № 23 УЗТМ при нагреве ротора массой 37,18 т

Для выявления особенностей тепловой работы печи был составлен тепловой баланс, при этом были измерены температур в нагреваемой поковке ротора в нескольких точках поверхности и температура рабочего пространства печи (см. таблица 1).

Таблица 1

Тепловой баланс печи № 23 УЗТМ

Статьи теплового баланса и показатели работы печи, $\frac{\text{кВт}}{\%}$	Температура печи, °С
	250-960
Приход теплоты (химическая теплота топлива)	$\frac{3975,3}{100}$
Теплота, затраченная на нагрев металла	$\frac{356,4}{8,97}$
Потери теплоты с уходящими газами	$\frac{2090,3}{52,58}$
Потери теплоты теплопроводностью через футеровку	$\frac{753,2}{18,95}$
Потери теплоты с приспособлениями (подвесная система)	$\frac{64,8}{1,63}$
Аккумуляции теплоты футеровкой	$\frac{710,6}{17,87}$
Время периодов нагрева, ч	73
Средний за период расход топлива, м ³ /ч	432,2
Удельный расход топлива, кг у.т./т	364,79

Основные показатели работы печи [3]:

- КПД суммарный $\eta_{\Sigma} = 8,31 \%$;
- удельный расход топлива $v = 364,79$ кг у.т. /т.

Аккумуляция теплоты футеровкой в этом балансе рассчитана по разности прихода и расхода теплоты, затраченной при нагреве ротора турбины.

Следует обратить внимание, что в расходной части теплового баланса аккумуляция теплоты футеровкой составляет примерно 18 % и потери теплопроводностью через футеровку – 19 %, что объясняется массивной футеровкой с достаточно высоким коэффициентом теплопроводностью.

Аккумуляция теплоты футеровкой печи – это сложный теплофизический процесс, связанный с нагревом футеровки, когда ее температурное поле изменяется во времени и по толщине печи.

Данная статья теплового баланса может быть рассчитана несколькими способами:

1. Наиболее простой расчет может быть выражен уравнением

$$Q_{\text{ак}} = m \cdot \bar{c}_{\text{ф}} \cdot (\bar{t}_{\text{ф.кон.}} - \bar{t}_{\text{ф.нач.}}) \cdot \tau, \text{ кДж} . \quad (1)$$

Кажущаяся простота формулы (1) может быть воспроизведена только при наличии экспериментальных данных о $\bar{t}_{\text{ф.нач.}}$, $\bar{t}_{\text{ф.кон.}}$ и τ , что возможно осуще-

ставить при установке термопар в тело футеровки во время монтажа печи. Но получение экспериментальных данных о параметрах состояния футеровки связано со значительными трудностями измерения этих параметров.

2. Методика Б.Ф. Зобнина.

Эта методика предназначена для расчета аккумуляции теплоты при состоянии циклического равновесия кладки, имеющей исходный запас теплоты ($t_{m0} \neq 0$), в основном для нагревательных печей, температура кладки которых в условиях нагрева горячих слитков не снижают, как правило, ниже $800\text{ }^\circ\text{C}$ по внутренней поверхности.

3. Методика В.Ф. Ратникова.

Расчет аккумуляции теплоты кладкой по этой методике характерен для относительно теплотехнически тонких стенок как для циклического равновесия температурного поля, так и в отсутствии его, для термических печей.

При нагреве кладки печи из холодного состояния рассчитывают суммарное количество теплоты, затраченное как на аккумуляцию, так и на потери теплоты вследствие теплопроводности в окружающую среду [2]:

$$q_{\Sigma} = \eta c_1 \rho_1 s_1 (t_{\text{вн}} - t_{\text{нач}}) \varphi(a_1 \tau_0 / s_1^2, a_2 / a_1), \quad (2)$$

Функции $\varphi(a_1 \tau_0 / s_1^2, a_2 / a_1)$ определяются с помощью графиков (см. рис 3 при $s_1/s_2=0,92$ и 4 при $s_1/s_2=1,84$).

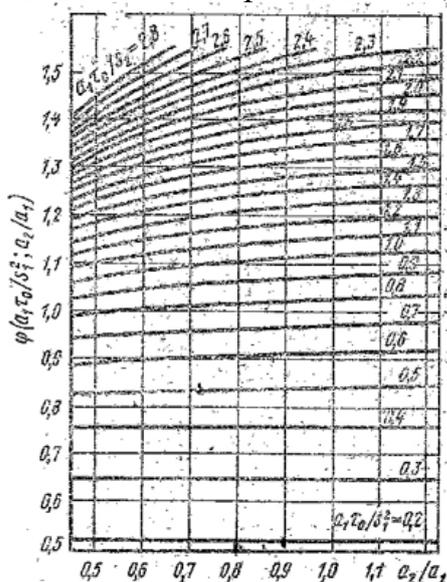


Рис. 3. График для определения функции φ при отношении $s_1/s_2=0,92$ и $\alpha_{\text{нар}}=14\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [2]

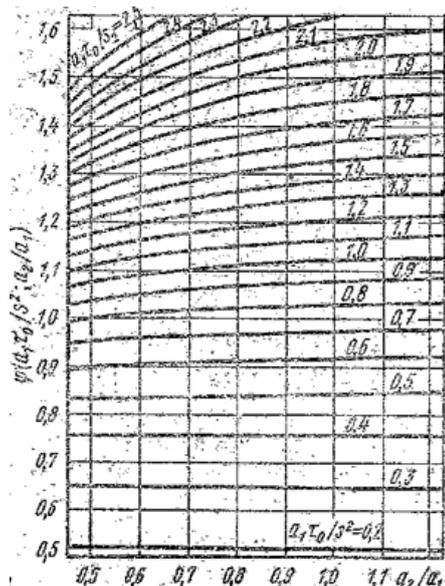


Рис. 4. График для определения функции φ при отношении $s_1/s_2=1,84$ и $\alpha_{\text{нар}}=14\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [2]

Для этого же режима нагрева печи был проведен расчет аккумуляции теплоты кирпичной двуслойной футеровкой (см. формулу 2) по методике В.Ф. Ратникова, с целью сравнения результатов этого расчета с экспериментом.

По результатам расчета получили $Q_{\text{ак}} = 732\text{ кВт}$. $\Delta Q_{\text{ак}} = 3\%$.

Методика В.Ф. Ратникова позволяет рассчитывать аккумуляцию теплоты футеровкой, выполненной по кирпичной технологии в термических печах, изменяющих свою температуру от начального холодного состояния.

Задача следующего сравнительного расчета проверить методику В.Ф. Ратникова для печей с керамо-волокнистой двуслойной футеровкой. Если этот расчет подтвердит возможность использования методики В.Ф. Ратникова для новых футеровок, то данные, полученные из экспериментальных тепловых балансов, позволят создать простую методику расчета аккумуляции теплоты, используя формулу (1). Эта формула может быть применена при условии нахождения среднemasсовых t футеровок.

Определение этих t расчетом возможно, если на основании экспериментальных исследований тепловых балансов печей этого типа будет найдена формула расчета среднemasсовых t . Тогда можно будет пользоваться простой формулой (1).

В этом и заключается совершенствование методики расчета аккумуляции теплоты волокнистой футеровкой.

Список использованных источников

1. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи «Машиностроение» / Б.Ф. Зобнин. – М., 1964. – 311 с.

2. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Изд. 3, переработанное и дополненное: учеб. пособ. для металлург. специальностей вузов / Под общ. ред. канд. техн. наук А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.

3. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок / Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. №9. – С. 38–43.

УДК 536.3

**С. З. Сапожников¹, Н. Е. Кикоть¹, А. В. Бикмулин¹, Ю. В. Андреев²,
В. М. Проскурин¹**

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Комитет по топливно-энергетическому комплексу Ленинградской области,
г. Санкт-Петербург, Россия

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ КАК СПОСОБ КОНТРОЛЯ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ

Аннотация. В энергетических установках принято измерять температуры в рабочей области. Такой подход не позволяет оценить стабильность рабочего режима. Предлагается контролировать и регулировать тепловые процессы при горении с использованием градиентной теплометрии – нового метода, основанного на использовании гетерогенных градиентных датчиках теплового потока. Метод апробирован при мониторинге процессов в