

5. Андрющенко, А. И. Парогазовые установки электростанций / А. И. Андрющенко, В. Н. Лапшов. – М.: Энергия, 1965. – 236 с.
6. Уваров, В. В. Газовые турбины и газотурбинные установки / В. В. Уваров. – М.: Высш. шк., 1970. – 320 с.
7. Калафати, Д. Д. Термодинамические циклы атомных электростанций / Д. Д. Калафати. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 280 с.
8. Гохштейн, Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок / Д. П. Гохштейн. – М.: Энергия, 1969. – 368 с.
9. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 276 с.

REFERENCES

1. Carnot, S. (1924) *Reflections on the Motive Power of Fire and on Machines Fitted to Develop that Power*. Moscow, State Publishing House.
2. Kirillin, V. A., Sychev V. V., & Sheidlin, A. E. (1968) *Engineering Thermodynamics*. Moscow, Energy.
3. Vyubov, D. N., Ivashchenko, N. A., Ivin, V. I., Kruglov, M. G., Leonov, O. B., Mednov, A. A., Mizerniuk, G. N., Orlin, A. S., & Roganov, S. G. (1983) *Internal-Combustion Engines. Theory of Piston and Compound Engines*. Moscow, Mechanical Engineering.
4. Alexandrov, A. A. (2004) *Thermodynamic Fundamentals of Thermodynamic Plant Cycles*. Moscow, MPEI Publishing House.
5. Andrioushenko, A. I., & Lapshov, V. N. (1965) *Gas Steam Plants of Power Stations*. Moscow, Energy.
6. Uvarov, V. V. (1970) *Gas Turbines and Gas Turbine Plants*. Moscow, Higher School.
7. Kalafati, D. D. (1963) *Thermodynamic Cycles of Nuclear Power stations*. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat.
8. Gokhshtein, D. P. (1969) *Modern Methods for Thermodynamic Analysis of Electric Power Plants*. Moscow, Energy.
9. Shargut, Ya., & Petela, R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energy.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики

Поступила 26.06.2013

УДК 621.365.2

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ФУТЕРОВКИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Канд. техн. наук, доц. КОРНЕЕВ С. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: svkor7@mail.ru

INFLUENCE OF LINING THERMAL PERFORMANCE IN ELECTRIC-ARC FURNACES ON POWER CONSUMPTION

KORNEEV S. V.

Belarusian National technical University

Представлен анализ особенностей тепловой работы футеровки электродуговых печей в различные технологические периоды. Показано, что на основе методов математического моделирования тепловых процессов возможно прогнозировать энергопотребление печей при прерывистом графике работы с учетом таких характеристик печи, как емкость, материалы футеровки печи, время простоев печи в закрытом и открытом состояниях и т. д. Показаны различия в тепловой работе кислой и основной футеровок электродуго-

вых печей. Представленный подход позволяет проанализировать тепловые потери теплопроводностью и на аккумуляцию кладкой и достаточно точно определять данные статьи баланса при расчете энергопотребления в разные периоды плавки для печей различной емкости.

Ключевые слова: тепловая работа футеровки электродуговой печи, энергопотребление.

Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

The paper presents an analysis of specific features of lining thermal performance in electric-arc furnaces at various technological periods. It has been shown that on the basis of mathematical modeling methods for thermal processes it is possible to predict power consumption of furnaces at the operational split schedule with due account of such furnace characteristics as capacity, lining materials, furnace idle times under closed and open conditions etc. The paper shows distinctions in thermal performance of acid and the basic linings in the electric-arc furnaces. The proposed approach allows to analyze thermal losses by heat conductivity and on accumulation by a refractory lining and rather accurately to determine the required balance sheet items while calculating power consumption during various periods of scrap melting for furnaces of various capacity.

Keywords: lining thermal performance in electric-arc furnace, power consumption.

Fig. 6. Tab. 2. Ref.: 8 titles.

Введение. Энергопотребление электродуговых печей малой емкости, используемых в машиностроительном комплексе, зависит в первую очередь от режима их работы. При стабильном непрерывном режиме удельные тепловые потери через футеровку печи определяются удельной поверхностью ограждающих конструкций и используемыми материалами. Тепловые потери через футеровку печи можно определить, используя данные о температуре кожуха печи и площади его поверхности, однако они не учитывают аккумуляцию теплоты самой кладкой.

Согласно ГОСТ 27729–88, в котором приведены данные, используемые при нормировании расхода электрической энергии в электродуговых печах, печи малой емкости имеют более высокие удельные расходы электрической энергии, чем крупные. Это является следствием того, что при уменьшении удельной площади поверхности футеровки печи (при увеличении емкости печи) снижаются удельные тепловые потери. Вместе с тем, при наличии переменного графика работы оборудования удельный расход электроэнергии может существенно возрасти.

Авторами выполнена оценка влияния тепловой работы футеровки на энергопотребление дугowych печей малой емкости. При моделировании тепловой работы футеровки печей были рассмотрены различные материалы, используемые для элементов ограждающих конструкций. В литейном производстве для электродуговых печей малой емкости широко применяются как кислые, так и основные огнеупоры: основные – при необходимости дефосфорации и десульфурации расплава в печи, кислые огнеупоры позволяют уменьшить затраты на футеровку печи, так как имеют большую стойкость и меньшую стоимость. Кроме того, у данных материалов меньшие значения коэффициентов теплопроводности (для кислых в среднем $\lambda = 1,64 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а для основных $\lambda = 5,59 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) и удельной теплоемкости – $0,29 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ у кислых против $0,35 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ у основных [1].

Для моделирования тепловой работы футеровки электродуговых печей были определены наиболее типичные для таких печей огнеупорные материалы, которые сведены к композициям на основе MgO, CaO, SiO₂ и Al₂O₃ различной плотности. Значения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости огнеупорных и теплоизоляционных материалов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов, применяемых в футеровке электродуговых сталеплавильных печей

№ п/п	Огнеупорный материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Источник
1	Периклазовый (магнезитовый) кирпич	2600–2800	$4,7 - 1,8 \cdot 10^{-3}t$	[2]
	Магнезитовый	2900	$5,97 - 2,94 \cdot 10^{-3}t$	[3]
	Высокоплотный магнезитовый	3250	$9,49 - 5,42 \cdot 10^{-3}t$	[3]
2	Шамот	1830–1950	$0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3}t$	[2]
		1900	$0,7 + 0,64 \cdot 10^{-3}t$	[4]
3	Асбестовый картон	1000–1250	$0,157 + 0,14 \cdot 10^{-3}t$	[5]
	Асбестовый изолирующий картон	720–900	0,11–0,21	[6]
4	Динас	1840–1970	$1,23 + 0,7 \cdot 10^{-3}t$	[2]
		1900	$1,111 + 0,14 \cdot 10^{-3}t$	[3]
5	Набивная кислая футеровка	1700	$0,815 + 0,68 \cdot 10^{-3}t$	[4]

Таблица 2

Значения удельной теплоемкости огнеупорных и теплоизоляционных материалов, применяемых в футеровке электродуговых сталеплавильных печей

№ п/п	Огнеупорный материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	Источник
1	Периклазовый (магнезитовый) кирпич	2600–2800	$1,05 + 0,29 \cdot 10^{-3}t$	[2]
	Периклазовый	–	$1,184 + 0,098 \cdot 10^{-3}(t + 273) - 0,274 \cdot 10^{-5}(t + 273)^2$	[3]
2	Шамот	1830–1950	$0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3}t$	[2]
		1900	$0,865 + 0,21 \cdot 10^{-3}t$	[4]
3	Асбестовый картон	1000–1250	0,835	[5]
4	Динас	1840–1970	$0,84 + 0,25 \cdot 10^{-3}t$	[2]
		1900–1950	$0,9 + 0,26 \cdot 10^{-3}t$	[7]
5	Набивная кислая футеровка	1700	$0,87 + 0,19 \cdot 10^{-3}t$	[4]

Оценка теплового состояния футеровки печи при ее разогреве и охлаждении. Определение температуры подины в период разогрева и охлаждения печи, а также после загрузки металлошихты выполнили на примере дуговой печи емкостью 6 т. Подина состояла из днища (кожуха) толщиной 16 мм, слоя листового асбеста толщиной 10 мм, слоя шамотной засыпки толщиной 10 мм, слоя шамотного кирпича толщиной 65 мм, трех слоев периклазового кирпича общей толщиной 295 мм и набивного рабочего слоя из периклазового порошка толщиной 100 мм. При расчете нестационарной теплопроводности в подине, состоящей из нескольких слоев

с различными теплофизическими характеристиками, использовали метод конечных элементов в двумерной (для наглядности) постановке задачи.

Уравнение теплопроводности запишем следующим образом:

$$\rho_j(T)c_{pj}(T)\frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{xj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{yj}(T_j)\frac{\partial T_j}{\partial y}\right),$$

где j – индекс рассматриваемого материала (слои футеровки, кожух); ρ_j – плотность материала; c_{pj} – изобарная теплоемкость материала; T_j – температура; τ – время; x, y, z – координаты; $\lambda_{xj}, \lambda_{yj}, \lambda_{zj}$ – коэффициенты теплопроводности.

В качестве граничного условия в задаче прогрева подины на ее внутренней поверхности была задана температура жидкой стали 1600 °С. Данная температура в реальных условиях плавки обеспечивается в среднем уже в середине периода расплавления при появлении на подине жидкого расплава (под дугой температура расплава больше, а на периферии – меньше).

Результаты расчетов распределения температуры по толщине подины для печей емкостью 6 т с основной и кислой футеровками для различных моментов времени представлены на рис. 1.

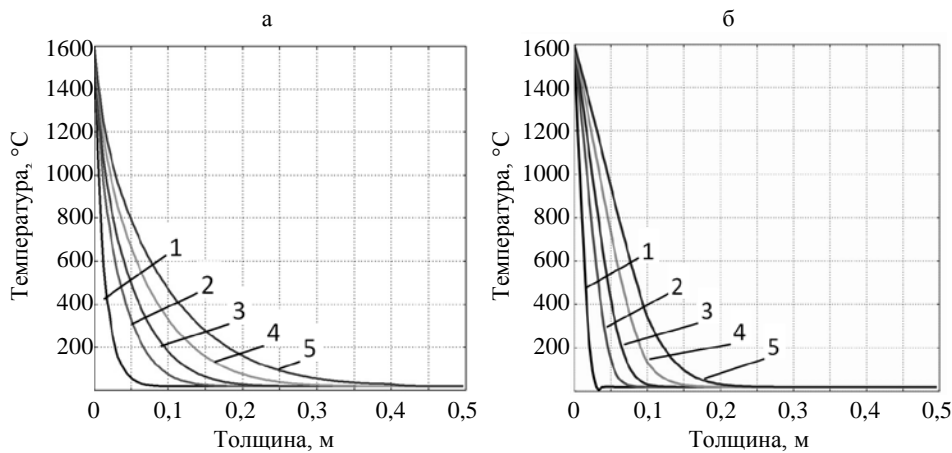


Рис. 1. Распределение температуры по толщине подины при ее разогреве в моменты времени: 1 – 100 с; 2 – 500; 3 – 1000; 4 – 2000; 5 – 3600 с для печи емкостью 6 т с основной (а) и кислой (б) футеровками

Особенностью коэффициента теплопроводности основных огнеупоров на основе магнезита являются его высокие значения при невысоких температурах и существенное уменьшение при нагреве. Для кислых футеровок на основе кварцита значения коэффициента теплопроводности при нагреве увеличиваются. Значения коэффициента теплопроводности в разные моменты времени по толщине подины при основной и кислой футеровках представлены на рис. 2.

Так как подина практически все время находится в нестационарном состоянии, то тепловой поток может быть значительно большим, чем получаемый при расчете задачи стационарной теплопроводности для многослойной стенки. При этом аккумулированная энергия может использоваться в начальный период плавки, либо безвозвратно теряться при простоях печи.

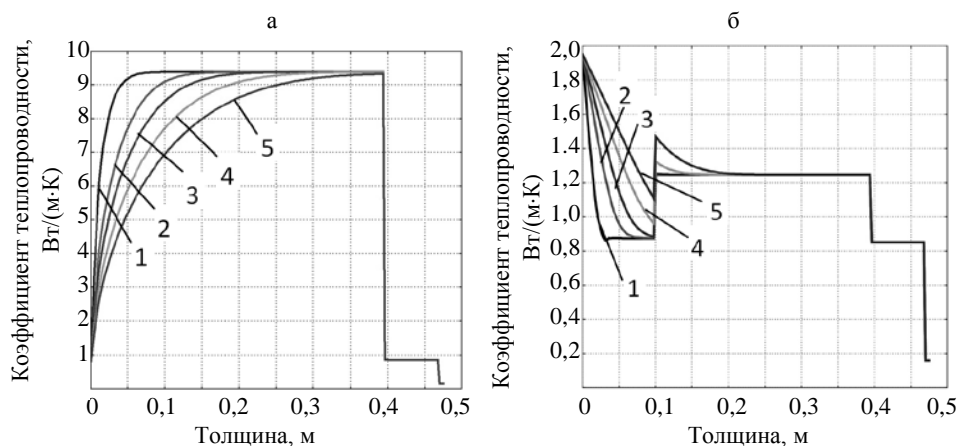


Рис. 2. Значение коэффициента теплопроводности по толщине подины в моменты времени: 1 – 100 с; 2 – 500; 3 – 1000; 4 – 2000; 5 – 3600 с для печи емкостью 6 т с основной (а) и кислой (б) футеровками

Среднее расчетное значение теплового потока за период $\tau = 1$ ч составило для подины из основных материалов $60,0 \text{ кВт/м}^2$, для кислой подины – $24,5 \text{ кВт/м}^2$. Это свидетельствует о том, что потери на нагрев подины в случае основной футеровки в 2,45 раза больше, чем кислой.

Для анализа процессов нагрева и охлаждения футеровки печи проведено физико-математическое моделирование процесса нагрева и охлаждения при использовании метода конечных элементов для решения дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах. Начальное распределение температур в подине, стенах и своде печи принимали с учетом ее разогрева. Температуру футеровки принимали равной $100 \text{ }^\circ\text{C}$, объемную мощность источника тепловыделения задавали исходя из максимальной мощности дуги, равной $2,5 \text{ МВт}$. Геометрические размеры приближенно соответствуют реальным размерам электродуговой печи постоянного тока емкостью 6 т.

Разогрев футеровки моделировали, используя ступенчатый график ввода мощности в печь, начиная с максимальной мощности $2,5 \text{ МВт}$ и снижая ее через 2000 с до $1,1 \text{ МВт}$ и далее через 2000 с – до $0,4 \text{ МВт}$. Затем ввод энергии в печь осуществляли с постоянной мощностью. При достижении температуры внутренней поверхности стен $1650 \text{ }^\circ\text{C}$ разогрев прекращали.

В последующем моделировали охлаждение печи с закрытым сводом. Результаты расчета распределения температур по толщине стенки с течением времени представлены на рис. 3.

Следует отметить, что несмотря на падение температуры внутренней поверхности кладки, среднemasсовая температура футеровки оставалась достаточно высокой на протяжении 4 ч и более. Особенностью печей малой емкости является использование аккумулированной футеровкой теплоты при нагреве металлошихты после загрузки ее в печь. При моделировании теплового состояния футеровки после загрузки металлошихты необходимо учесть передачу теплоты излучением от футеровки к металлошихте. Для серых тел радиационный поток можно записать в следующем виде:

$$q_j = \varepsilon_j (P_j - \sigma T_j^4),$$

где ε_j – излучательная способность поверхности тела; P_j – полный, падающий на поверхность тела радиационный поток; σ – постоянная Стефана – Больцмана; T_j – температура поверхности тела.

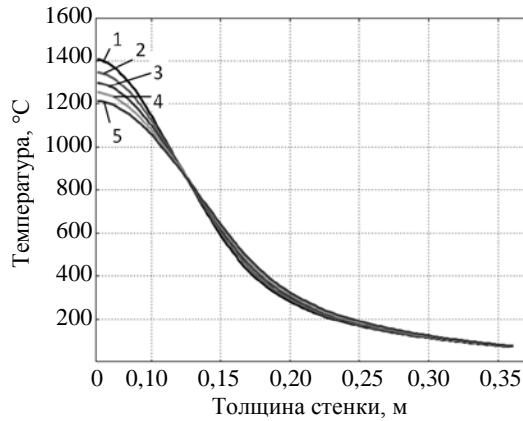


Рис. 3. Распределение температуры по толщине стенки печи при ее остывании в течение 2000 с: 1 – начальное состояние; 2 – 500 с; 3 – 1000; 4 – 1500; 5 – 2000 с

Полный, падающий на поверхность тела радиационный поток можно представить

$$P_j = P_{mj} + F_{aj} \sigma T_{aj}^4,$$

где P_{mj} – взаимное излучение, приходящее от всех поверхностей в модели, Вт/м²; F_{aj} – коэффициент облученности, равный доле области пространства, не покрытой другими поверхностями, и изменяющийся в пределах от 0 до 1; T_{aj} – температура удаленного источника (среды).

Результаты расчета падения температуры футеровки после загрузки металлошихты и ее нахождения в рабочем пространстве печи в течение 600 с представлены на рис. 4. Особенности задания коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости металлошихты приведены в [8].

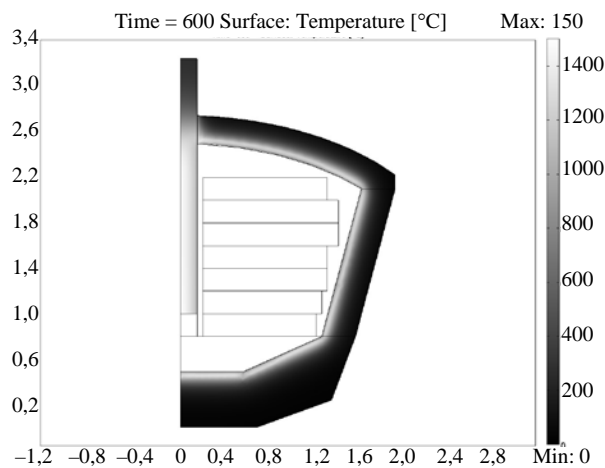


Рис. 4. Температурное поле футеровки печи емкостью 6 т после 600 с от загрузки металлошихты

В отличие от охлаждения футеровки печи при остывании с закрытым сводом, при загруженной «холодной» шихте наблюдается быстрое охлаждение поверхностного слоя стен и подины, что представлено на рис. 5.

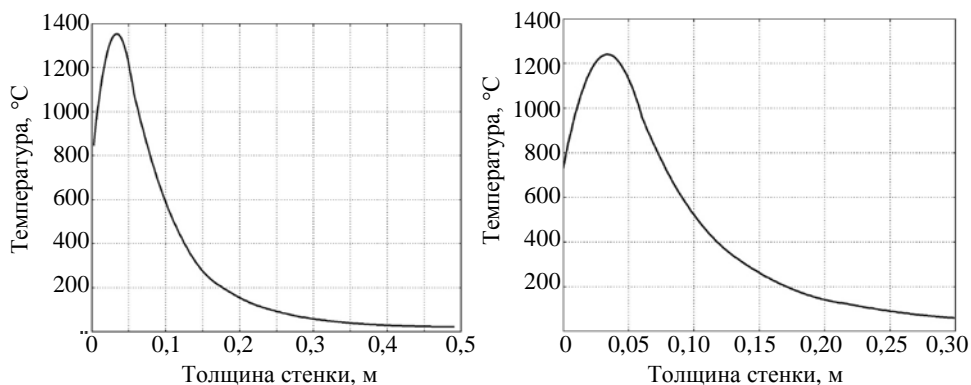


Рис. 5. Распределение температуры в подине и в стенке печи емкостью 6 т после 10 мин, прошедших от загрузки металлошихты без подачи энергии в печь

Экспериментальные исследования энергопотребления дуговых печей. Теоретические исследования, приведенные выше, показывают, что за период межплавочного простоя может рассеиваться большое количество энергии, накопленной внутренней частью футеровки печи, даже при закрытом своде и технологическом окне. Эти потери напрямую зависят от времени, прошедшего между плавками. Для определения реальных потерь и зависимости удельного расхода от режима работы цеха проведены контрольные замеры потребляемой активной и реактивной мощностей за недельный период. Анализировали показатели работы двух электродуговых печей переменного тока емкостью 3 т с основной футеровкой в ОАО «Белоозерский энергомеханический завод». Данные по девяти плавкам сведены в диаграмму, представленную на рис. 6.

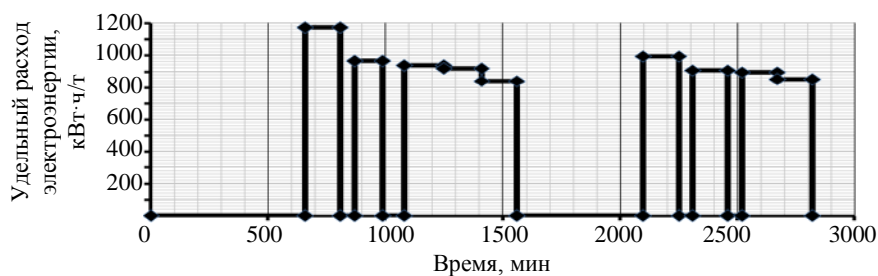


Рис. 6. Зависимость удельного расхода электрической энергии на плавку от времени межплавочных простоев

Как следует из диаграммы рис. 6, при непрерывной работе печи удельный расход электрической энергии приближается к 800 кВт·ч/т (минимальное значение составило 841 кВт·ч/т). После длительных простоев (более 10 ч) удельный расход электрической энергии увеличивался и приближался к 1200 кВт·ч/т. Так как после простоя в течение 9 ч удельный расход составил 995,8 кВт·ч/т, то расход в 1200 кВт·ч/т после более 10 ч простоев можно считать максимальным и характерным для разогрева печи с «холодного» состояния. Тогда, учитывая время простоев между соседними

плавками, удельный расход электрической энергии для данных печей можно записать в следующем виде:

$$q = q_1 + nk + mk_1 \leq q_2,$$

где q_1 – удельный расход электрической энергии при непрерывном режиме работы печи заданной емкости при выплавке определенной группы марок стали, кВт·ч/т; q_2 – удельный расход электрической энергии при первой плавке с «холодного» состояния, кВт·ч/т; n, m – коэффициенты, зависящие от типа футеровки и конструктивных особенностей печи; k, k_1 – количество часов простоя закрытой и открытой печи соответственно.

Для рассматриваемого случая (печь емкостью 3 т с основной футеровкой) в соответствии с результатами, полученными при исследовании тепловой работы печей, выражение запишем в виде

$$q = 800 + 22k + 120k_1 \leq 1200 \text{ кВт·ч/т.}$$

Средний удельный расход по девяти представленным плавкам (рис. 6) составил 942,6 кВт·ч/т, а превышение удельного расхода над минимальным на данных плавках составило 101,6 кВт·ч/т.

ВЫВОД

Показаны различия в тепловой работе кислой и основной футеровок электродуговых печей, а также необходимость учета режима работы печей при прогнозировании удельного расхода электрической энергии. Представленный подход позволяет проанализировать тепловые потери теплопроводностью и на аккумуляцию кладкой и достаточно точно определять данные статьи баланса при расчете энергопотребления в разные периоды плавки для печей различной емкости. Средний расход электрической энергии в реальных производственных условиях существенно зависит от режима работы печей. Следовательно, для оптимизации расходов и уменьшения себестоимости стали для углеродистых и низколегированных марок, доля затрат на энергоносители для которых существенна, нужно обеспечивать минимально возможные простои между плавками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрин, В. А. Перспективы использования кислых сталеплавильных процессов / В. А. Кудрин // *Сталь*. – 2001. – № 11. – С. 15–17.
2. Губинский, В. И. *Металлургические печи: учеб. пособие* / В. И. Губинский. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
3. Факторович, Л. М. *Тепловая изоляция* / Л. М. Факторович. – Л.: Недра, 1966. – 82 с.
4. Соيفер, В. М. *Выплавка стали в кислых электропечах* / В. М. Соифер. – М.: Машиностроение, 2009. – 480 с.
5. *Расчет нагревательных и термических печей: справ. изд-е* / С. Б. Василькова [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1983. – 480 с.
6. *Физические величины: справ.* / А. П. Бабичев [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Чиркин, В. С. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники* / В. С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.
8. Тимошпольский, В. И. *Влияние геометрических и теплофизических параметров шихтовых материалов на скорость их нагрева* / В. И. Тимошпольский, С. В. Корнеев // *Сборник материалов 5-й Междунар. технич. конф. «Наука – образованию, производству, экономике»*, БНТУ, г. Минск, 2007 г. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 236–241.

REFERENCES

1. Kudrin, V. A. (2001) Prospects for Usage of Acid Steel-Making Processes. *Stal [Steel]*, (11), 15–17.
2. Gubinsky, V. I. (2006) *Metallurgic Furnaces*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine.
3. Faktorovich, L. M. (1966) *Thermal Insulation*. Leningrad. Nedra.
4. Soyfer, V. M. (2009) *Steel Melting in Acid Electric Furnaces*. Moscow, Mechanical Engineering.
5. Vasilkova, S. B., Genkina, M. M., Gusovskii, V. L., Lifshits, A. E., Masalovich, V. G., Perimov, A. A., Spivak, E. I., & Tymchak, V. M. (1983) *Calculation of Heating and Thermal Furnaces*. Moscow, Metallurgia.
6. Babichev, A. P., Babushkina, N. A., Bratkovskii, A. M., Brodov, M. E., & Bystrov, M. V. (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat.
7. Chirkov, V. S. (1967) *Thermal-Physical Properties of Materials in Nuclear Engineering*. Moscow, Atomizdat.
8. Timoshpolsky, V. I., & Korneev, S. V. (2007) Influence of Geometric and Thermal-Physical Parameters of Charging Material on its Heating Rate. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 5 Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Proceedings of the 5th International Technical Conference on Science for Education, Industry, Economy]. Minsk: BNTU, Vol. 1, 236–241.

Представлена кафедрой
металлургических технологий

Поступила 15.07.2013

УДК 621.039.586

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОТВОДА ОСТАТОЧНЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ АЭС С ВВЭР

Инж. ХАЛЕД Н., канд. техн. наук ШЕВЕЛЕВ Д. В., инж. БАЛАШЕВСКИЙ А. С.

*Севастопольский национальный университет
ядерной энергии и промышленности*

E-mail: balaas@ua.fm

CLASSIFICATION OF SYSTEMS FOR PASSIVE AFTERHEAT REMOVAL FROM REACTOR CONTAINMENT OF NUCLEAR POWER PLANT WITH WATER-COOLED POWER REACTOR

KHALED N., SHEVELEV D. V., BALASHEVSKY A. S.

Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry

Разработана классификация систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов, что позволяет провести детальный анализ различных концепций систем пассивного отвода остаточных тепловыделений от защитных оболочек ядерных реакторов нового поколения. Рассмотрены основные классификационные признаки данных систем.

Ключевые слова: система пассивного отвода остаточных тепловыделений, ядерный реактор, защитная оболочка.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.