

УДК: 669.184.125.001.891.57

© Харлашин П.С.<sup>1</sup>, Ассиіл Мохаммед Кадхим<sup>2</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ФУТЕРОВКИ 160 т  
КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА С УЧЕТОМ ГАРНИСАЖА**

*Разработана модель, решена система уравнений теплопроводности для футеровки. Получено распределение температуры в цилиндрической части футеровки 160 т кислородного конвертера с учетом цикличности и наваривания защитной корочки, например, при факельном торкретировании.*

**Ключевые слова:** кислородный конвертер, футеровка, цикличность плавки, уравнение теплопроводности.

*Харлашин П.С., Ассиіл Мохаммед Кадхим. Моделирование тепловой работы футеровки 160 т кислородного конвертера с учетом гарнисажа. Разработана модель, решена система уравнений теплопроводности для футеровки. Отримано розподіл температури в циліндричній частині футеровки 160 т кислородного конвертера з урахуванням циклічності та наварювання захисної скориночки, наприклад, при факельному торкретуванні.*

**Ключові слова:** кисневий конвертер, футеровка, циклічність плавки, рівняння теплопроводности.

*P.S. Kharlashin, Assiil Mohammed Kadhim. Simulation of thermal lining works 160 t oxygen converter with regard to skull. Developed a model system of heat equations solved for the lining. The distribution of temperature in the cylindrical part of the liner 160 t oxygen converter cycles and given weld protective crust, such as a flare filling.*

**Keywords:** the oxygen converter, lining, cyclical melting, heat equation.

**Постановка проблемы.** Решение проблемы энерго- и ресурсосбережения при производстве стали в кислородных конвертерах прежде всего зависит от совершенствования теплового баланса плавки, сокращения тепловых потерь во время простоя, повышения стойкости футеровки и др. Стоимость смены огнеупорной футеровки 160т конвертера массой 270т на ПАО «ММК им. Ильича» составляет 2,6 млн. грн., что существенно влияет на себестоимость стали.

Возможности повышения стойкости футеровки без нанесения шлакового гарнисажа, но при факельном торкретировании еще далеко не исчерпана. Еще остаются неясным, как наваривание защитного слоя в период знакопеременных тепловых воздействий реального технологического процесса производства стали в 160 т кислородном конвертере влияет на тепловое состояние футеровки. Тема является актуальной, так как улучшение тепловой работы конвертера – реальный путь к уменьшению расхода чугуна в балансе конвертерной плавки, снижению себестоимости стали.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] показано, что после внедрения на комбинате технологии факельного торкретирования стойкость футеровки возросла более чем в 2 раза.

В кислородно-конвертерных цехах накопился опыт, позволяющий оценить механизм износа периклазоуглеродистых огнеупоров [2].

Ряд металлургических комбинатов добились значительных успехов при решении проблемы повышения стойкости футеровки. На зарубежных метзаводах стойкость футеровки доведена до 10 - 25 тыс. плавов и более. При этом используется комплекс мероприятий, но, прежде всего это – пневматическое разбрызгивание магнезиальных шлаков и факельное торкретирование.

Публикаций по решению задачи о распределении температур в футеровке с учётом цикличности конвертерной плавки не найдено.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

**Цель работы** – используя численные методы решения дифференциальных уравнений теплопроводности получить распределение температуры в различных слоях по толщине футеровки с учетом цикличности и степени её износа.

**Изложение основного материала. Физическая модель.** На рис. 1 и 2 представлена схема футеровки 160т конвертера с характерными размерами по слоям. В настоящей работе дано решение по цилиндрической части футеровки, которая, считая от расплава, состоит из следующих слоев: из четырёх характерных слоёв, указанных ниже. Особенность тепловой работы кислородного конвертера – цикличность, что приводит к знакопеременным тепловым воздействиям на слои футеровки, обращенных к полости конвертера. Так как в результате выгорания примесей расплава выделяется большая энергия в виде теплоты, то, с одной стороны, существенно увеличивается аккумулирующая способность футеровки, а с другой - в течение всей кампании неизбежны большие потери теплоты в период плановых и внеплановых простоев. Естественно, что потери существенно влияют на расход чугуна. Эти взаимосвязанные процессы ещё в полной мере не изучены.

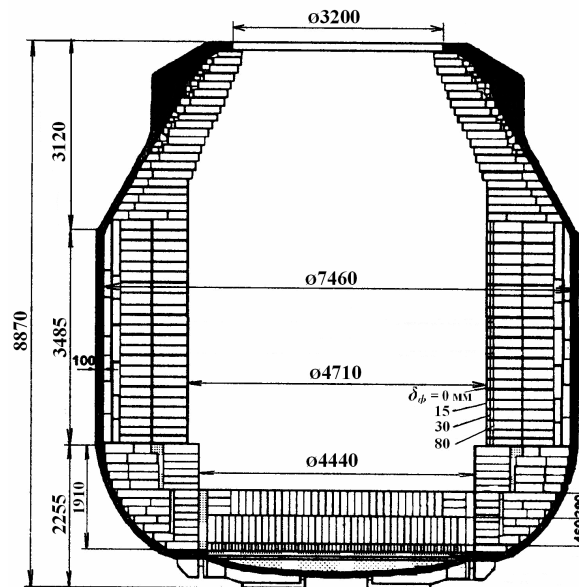


Рис. 1 – Футеровка 160 т кислородного конвертера

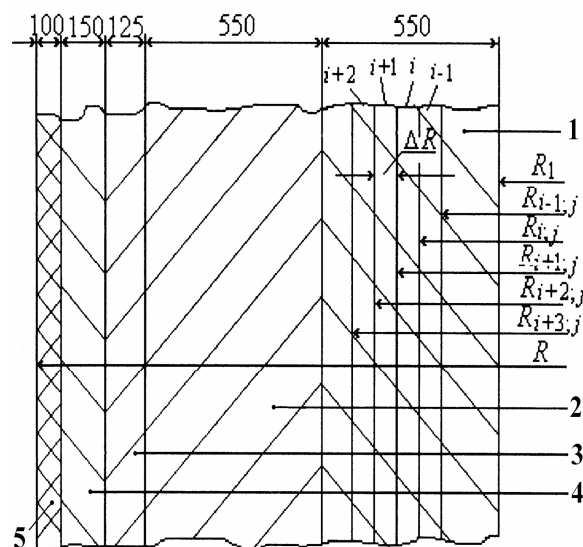


Рис. 2 – Схема расположения футеровки цилиндрической части 160 т конвертера

В соответствие с технологическими особенностями конвертерной плавки, на внутренней границе необходимо выделить 3 возможных режима:

1. *Разогрев футеровки.*

2. *Плавка*, когда конвертер частично заполнен железоуглеродистым расплавом и идет продувка.

3. *Период между плавками.*

*Нагрев цилиндрической части и днища футеровки.* После завершения кладки футеровка конвертера должна быть разогрета. Стойкость футеровки существенно зависит от правильно выбранного теплового режима. Поэтому необходимо уметь управлять процессом разогрева и знать температурное поле футеровки как в процессе разогрева, так и перед первой плавкой, уметь определять потери теплоты в период плановых и внеплановых простоев.

Тепловой поток направлен от продуктов горения к футеровке. В таком случае энергия к поверхностному слою передается в основном излучением. Конвективный поток целесообразно учесть только поправочным коэффициентом в лучистой составляющей. Так как температура газа достаточно велика, то конвективная составляющая не превышает 10 %.

Футеровка состоит из нескольких слоев (рис. 2), где использовали следующие огнеупоры: 1 – периклаз безобжиговый на смоляной смазке; 2 – периклазоуглеродистые; 3 – периклазоуглеродистые на смоляной связке; 4 – хромитопериклазовые. На рис. 2 позиция 5 – сталь 09Г2С.

Заметим, что для условий 160 т конвертера толщина футеровки в 5 и более раз меньше ее высоты. Кроме того, условия теплообмена по окружности будем считать одинаковыми. Это позволяет рассматривать изменение температуры футеровки лишь вдоль радиуса и задачу нагрева можно описать одномерным уравнением теплопроводности.

Для процесса разогрева кладки использовали дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими условиями однозначности [3]. Так как значительная часть футеровки представляет собой цилиндрические поверхности, то для этой части целесообразно дифференциальное уравнение теплопроводности записывать в цилиндрической системе координат. Необходимо также учитывать, что футеровка конвертера состоит из нескольких слоев, свойства которых отличаются друг от друга. Поэтому в работе учитывали изменение теплофизических свойств каждого слоя в зависимости от его температуры.

Такую операцию проводили отдельно для днища и цилиндрической части.

*Методы расчёта температурного поля футеровки конвертера.*

С учетом сказанного дифференциальное уравнение теплопроводности для цилиндрической части футеровки запишем как

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $кг/м^3$ ;  $c$  – теплоёмкость,  $кДж/(кг \cdot K)$ ;  $t$  – температура,  $^{\circ}C$ ;  $\tau$  – время,  $с$ ;  $r$  – текущий радиус,  $м$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ .

Для футеровки при изменении температуры более чем на 1000К, считали, что  $c$  и  $\lambda$  зависят от температуры, лишь плотность  $\rho$  можно принять величиной постоянной.

Таким образом, уравнение (1) нелинейно и аналитического решения в общем виде не имеет.

Принимая идеальным контакт между слоями, на их границе выполняются условия непрерывности температуры и плотности теплового потока

$$t_i = t_{i+1} \text{ и } \left( \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial r_i} \right)_{r_i=r_{i+1}} = \left( \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial r_{i+1}} \right)_{r_i=r_{i+1}}. \quad (2)$$

Рассмотрим граничные условия при сушке или разогреве футеровки. Внутренняя сторона футеровки нагревается за счет конвекции и излучения. Тогда множитель правой части уравнения (2) равен

$$\left( \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} \right)_{r=r_1} = \alpha_1 (t_o - t_1) + \sigma_1 \left[ (t_o + 273)^4 - (t_1 + 273)^4 \right], \quad (3)$$

где  $t_1$  – температура на внутренней стороне футеровки, °C;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности первого слоя футеровки (нумерация слоев идет от внутренней поверхности),  $Bm/(m \cdot K)$ ;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к поверхности футеровки,  $Bm/(m^2 \cdot K)$ ;  $t_i$  – температура греющей среды, °C;  $\sigma_1$  – приведенный коэффициент излучения от греющей среды к поверхности футеровки,  $Bm/(m^2 \cdot K^4)$ .

Пренебрегая излучением на наружной поверхности (корпуса конвертера), граничные условия можно записать в виде

$$\left( \lambda_N \frac{\partial t_N}{\partial r} \right)_{r=r_{N+1}} = \alpha_2 (t_{N+1} - t_{\text{в}}), \quad (4)$$

где  $N$  – число слоев,  $\lambda_N$  – коэффициент теплопроводности корпуса,  $t_{N+1}$  – температура на наружной поверхности последнего слоя (наружная поверхность корпуса конвертера),  $t_{\text{в}}$  – температура окружающего воздуха,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности корпуса к окружающему воздуху.

Таким образом, нелинейность присутствует и в граничных условиях. Как указано выше, такие задачи не имеют аналитического решения. Поэтому эту задачу решали численным методом.

Для составления дискретного аналога уравнения теплопроводности футеровки днища разобьем на элементарные слои толщиной  $\Delta x = 5$  мм.

Составим уравнение теплового баланса для слоя  $i$ . Из формулы (1) тепловой поток от слоя  $i - 1$  к слою  $i$  составит

$$\Delta Q_- = \lambda_{i-1} \frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x}. \quad (5)$$

Тепловой поток от слоя  $i$  к слою  $i + 1$  равен

$$\Delta Q_+ = \lambda_{i+1} \frac{t_{i,j} - t_{i+1,j}}{\Delta x}. \quad (6)$$

Изменение энтальпии  $i$ -го слоя находили как

$$\Delta H = \rho_i c_i \Delta x (t_{i,j+1} - t_{i,j}). \quad (7)$$

Тогда уравнение теплового баланса принимает вид

$$\rho_i c_i \Delta x (t_{i,j+1} - t_{i,j}) = \lambda_{i-1} \frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} \Delta \tau - \lambda_{i+1} \frac{t_{i,j} - t_{i+1,j}}{\Delta x} \Delta \tau, \quad (8)$$

откуда температура  $i$ -го слоя в последующий момент времени составит

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \frac{\lambda_{i-1} \Delta \tau}{\rho_i c_i \Delta x^2} (t_{i-1,j} - t_{i,j}) - \frac{\lambda_{i+1} \Delta \tau}{\rho_i c_i \Delta x^2} (t_{i,j} - t_{i+1,j}), \quad (9)$$

где  $\lambda_{i-1}$  – коэффициент теплопроводности слоя  $i - 1$  при температуре на границе между слоями  $i - 1$  и  $i$ ,  $\lambda_{i+1}$  – коэффициент теплопроводности слоя  $i + 1$  при температуре на границе между слоями  $i$  и  $i + 1$ ,  $t_{i,j}$ ;  $t_{i-1,j}$ ;  $t_{i+1,j}$  – температура соответствующих слоев в данный момент времени.

Дополнительно к (9) необходимо еще составить балансовые уравнения для первого и последнего элементарных слоев и дополнительно рассмотреть условия на границе между двумя различными материалами.

На границе 1-го элементарного слоя возможны два варианта:

1. При разогреве футеровки или в период между плавками тепловой поток можно представить в виде суммы конвективного и лучистого потоков

$$\Delta Q = \alpha_1 (t_{\text{эфф.1}} - t_{i-\frac{1}{2},j}) + \sigma_{\text{нр.1}} \left[ (t_{\text{эфф.1}} + 273)^4 - (t_{i-\frac{1}{2},j} + 273)^4 \right]. \quad (10)$$

*Разностная форма уравнения теплопроводности.* Составим дискретный аналог уравнения теплопроводности для цилиндрической части конвертера. Для составления дискретного

аналога уравнения теплопроводности футеровку разбивали на  $N$  слоев, каждый толщиной  $\Delta R$ . Первый слой со стороны жидкой стали имеет толщину  $0,5 \Delta R$ . Температуру слоя будем характеризовать температурой в центре его. Рассматривали достаточно малый интервал времени  $\Delta t$  и, следовательно, в любой момент времени  $\Delta t \cdot j$ . Здесь  $j = 0, 1, 2, \dots$  – номер интервала времени от начала процесса. Таким образом, температуру каждого слоя обозначали  $t_{i,j} = 1, 2, 3 \dots; j = 0, 1, 2, \dots$ . Так как площадь границы слоя изменяется в зависимости от того, где он расположен, то тепловой баланс для интервала времени  $\Delta t$  нужно составлять с учётом площади границы слоя. При этом толщину слоя выбирали с учетом свойств материала футеровки. Отсчет слоев производили от внутренней поверхности футеровки конвертера радиусом  $R_1$ . Толщину элементарного слоя выбирали одинаковой по всей толщине и обозначали ее через  $\Delta R$ . В пределах слоя теплофизические свойства на интервале времени  $\Delta t$  можно считали постоянными.

Аналогично записав уравнение для теплового потока от слоя  $i - 1$  к слою  $i$  от слоя  $i$  к слою  $i + 1$ , а также составляя уравнение теплового баланса находили, что температура промежуточных слоев составляет

$$t_{i,j} = t_{i,j} + \frac{\lambda_{i-1} \Delta \tau}{\rho_i c_i \Delta R^2} (t_{i-1,j} - t_{i,j}) - \frac{\lambda_{i+1} \Delta \tau}{\rho_i c_i \Delta R^2} \left( 1 + \frac{\Delta R}{R_i} \right) (t_{i,j} - t_{i+1,j}), \quad (11)$$

где  $\Delta R = R_{i+1} - R_i$ .

Так как футеровка конвертера состоит из различных материалов, то уравнения теплового баланса составляли для всех элементарных слоев и дополняли их уравнением, описывающим условия на границе двух различных материалов. Первый слой цилиндрической части футеровки состоит из периклазовых кирпичей и имеет толщину 550 мм (рис. 2). В нем расположено  $N_1 = 550 / \Delta R$  (при  $\Delta R = 5$  мм  $N_1 = 110$ ) элементарных слоев. Слой металлического корпуса будет содержать  $N_4 = 100 / 5 = 20$  элементарных слоев.

Сделаем оценку возможных значений коэффициентов теплоотдачи и приведенного коэффициента излучения на границах. На внешней границе суммарный коэффициент теплоотдачи может быть принят в пределах  $\alpha_2 = 15 - 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Значение его существенно зависит от климатических условий и слабо будет зависеть от температуры корпуса конвертера, которая обычно должна находиться в пределах  $\sim 100 - 200^\circ\text{C}$ . К концу кампании она может несколько увеличиться, но при этом существенно изменяется и толщина кладки. В данном расчете рассматривается начальный период кампании и, следовательно, принимаются проектные размеры футеровки.

2. *Второй период.* На поверхности, контактирующей с расплавом (днище и цилиндрическая часть высотой во время продувки  $\sim 1,6$  м) можно принимать граничные условия 1-го рода – температура на внутренней поверхности футеровки равна температуре жидкометаллической ванны.

В период плавки принимали определенный уровень металла в конвертере, который рассчитывали по объёму жидкометаллического расплава. Для той части футеровки, которая омывается расплавом, принимали, что температура внутреннего слоя футеровки равна температуре расплава, причём она линейно изменяется во времени от температуры жидкого чугуна до температуры жидкой стали при выпуске. Для остальной части футеровки принимали граничные условия 3 рода – теплообмен является лучистым, а за период продувки температура конвертерных газов линейно изменяется от  $1400^\circ\text{C}$  до  $1700^\circ\text{C}$ . При этом приведенный коэффициент излучения принимали равным  $\sigma_{np} = Bm/(M^2 \cdot K^4)$ . Так как расчет вели только для днища и цилиндрической части футеровки, то при определении энтальпии всей футеровки нужно учитывать энтальпию горловины футеровки конвертера, допуская при этом, что удельная энтальпия цилиндрической части и горловины одинаковы. Тогда, определив среднюю удельную энтальпию для цилиндрической части, умножали ее на массу футеровки горловины и находили энтальпию горловины. В процессе расчёта находили энтальпию каждого элементарного слоя и затем суммировали.

В период между плавками тепловой поток направлен от продуктов горения к футеровке. В таком случае теплота к поверхностному слою передается в основном излучением. Конвективный поток целесообразно учесть только поправочным коэффициентом в лучистой составляющей. Так как температура газа достаточно велика, то конвективная составляющая не превышает 10 %.

Расчёты вели отдельно для днища, цилиндрической части, занятой жидким металлом и остальной цилиндрической частью футеровки.

*Последовательность расчёта.* После определения шага по координате и времени, при которых обеспечивается устойчивость решения, приступали к расчёту. В зависимости от конкретных условий в полости конвертера выбирали граничные условия на внутренней поверхности. В период разогрева футеровки превалирует лучистая составляющая теплового потока. Тогда при расчёте использовали граничные условия 3-го рода и считали, что температура одинакова для всей кладки. Эти же условия использовали и при охлаждении футеровки в межплавочный период.

*Исходные данные.* Расчет был выполнен применительно к 160 т конвертеру ПАО «ММК им. Ильича». Принимали, что коэффициент теплоотдачи от газов к внутренней стенке  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , коэффициент теплоотдачи от внешней стенки  $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура греющей среды  $t = 1800^\circ\text{C}$ , начальная температура чугуна  $t_н = 1300^\circ\text{C}$ , конечная температура стали  $t_с = 1660^\circ\text{C}$ , Цилиндрическая часть : диаметр корпуса  $D = 7,46 \text{ м}$ , высота  $h = 4 \text{ м}$ , износ футеровки за плавку  $\delta = 1 \text{ мм}$ . Коэффициент температуропроводности  $\lambda$  и теплоёмкости  $c$  рассчитывали в зависимости от температуры. Например, для периклазовых огнеупоров принимали, что их плотность  $\rho = 2770 \div 3000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 2,63 - 1,15 \cdot 10^{-3} t + 0,429 \cdot 10^{-6} t^2$ ; а теплоёмкость  $c = 0,998 + 0,223 \cdot 10^{-3} (t + 273) - 0,208 \cdot 10^{-5} (t + 273)^2$ . Масса футеровки горловины  $m_к = 68 \text{ т}$ , масса цилиндрической части и днища  $m_ц \sim 200 \text{ т}$ . Площадь поверхности горловины и цилиндрической части конвертера составляет  $150 \text{ м}^2$ .

Циклограмма плавки включает следующие периоды: завалка лома – 3,5 мин, заливка чугуна – 3,5 мин, продувка кислородом - 22 мин, слив стали – 10 мин и, слив шлака - 2 мин, осмотр и ремонт футеровки - 11 мин.

*Анализ теплового состояния футеровки при условии цикличности технологического процесса.*

*Плавки без износа футеровки.* Как видно из рис. 3, максимальная температура футеровки  $t_ф$  достигается на 29 мин каждой из 4 рассмотренных плавки в слое толщиной 15 мм ещё поддерживается значительный перепад температур (~400°C). Однако на расстоянии 80 мм от наружного слоя даже в период продувки резкого изменения температуры не происходит. Расчёты показали, что на 396 – 400 плавках общая закономерность изменения температуры сохраняется, но футеровка становится более разогретой.

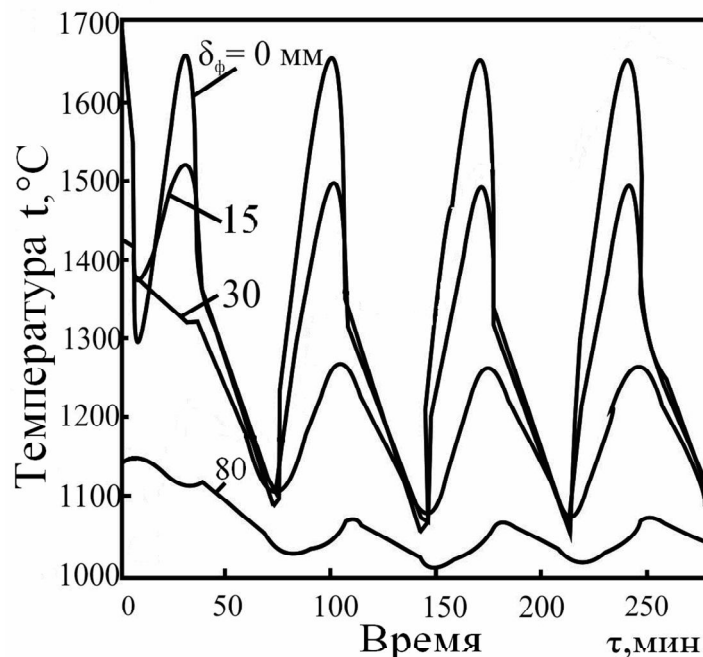


Рис. 3 – Циклограмма изменения температуры на поверхности футеровки в течение 4-х плавки 160т конвертера с учётом факельного торкретирования

На рис. 3 представлено изменение температуры при различной степени износа футеровки цилиндрической части 160 т конвертера. Расчёты были выполнены при следующих исходных данных. Коэффициент теплоотдачи от внутренней и внешней стенки футеровки соответственно составляют  $\alpha_{\text{в}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\alpha_{\text{к}} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура греющей среды  $t_2 = 1800^\circ\text{C}$ , конечная температура стали  $t_p = 1660^\circ\text{C}$ , износ футеровки за плавку 0 мм.

Расчёты были выполнены для двух существенно различных состояний футеровки конвертера - когда износ составляет  $\delta = 1$  мм за плавку и когда в результате ошлаковывания или факельного торкретирования появился защитный гарнисаж, на котором и проводится текущая плавка ( $\delta = 0$ ). При этом был выбран наиболее тяжёлый режим тепловой работы конвертера, когда простоев нет. При реализации технологии защиты футеровки от износа достигается следующие положительные эффекты - экономится дорогостоящая футеровка, шлак используется как защитный материал для неё, появляется возможность обеспечить частичное дожигание CO и тем самым сокращается расход чугуна, уменьшаются конвективные потери от корпуса в окружающую среду, а так же, что немаловажно, можно снизить тепловую нагрузку котла-утилизатора - самого ненадёжного элемента в схеме производства стали с полным дожиганием конвертерного газа. Расчёты показали, что видно, что на первой плавке в слое толщиной  $\delta = 200$  мм, считая со стороны металла, возникает перепад температур, достигающий  $1200^\circ\text{C}$ , футеровка прогревается всего лишь на глубину  $\sim 400$  мм. С каждой последующей плавкой температурный градиент сокращается.

Характерно, что если текущие плавки проводить на гарнисаже и футеровка не изнашивается, то температура корпуса в этих условиях снижается на  $\sim 46^\circ\text{C}$ , с 396 до  $350^\circ\text{C}$ . Если коэффициент теплоотдачи от металлического корпуса в окружающую среду  $\alpha_{\text{к}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , то общая потеря теплоты в окружающую среду цилиндрической частью и горловиной составляет  $\sim 5 \text{ МВт}$ .

#### Выводы

1. Впервые разработана модель расчета футеровки с учетом цикличности конвертерной плавки. Знакопериодичность от последней плавки к предыдущей существенно изменяет картину тепловых полей футеровки по её толщине.
2. Разработанная модель позволяет определить температуру футеровки по глубине слоя и наружной поверхности корпуса конвертера с учётом цикличности плавки и образующейся защитной корочки.

#### Список использованных источников:

1. Теория и практика факельного торкретирования футеровки 160 т кислородных конвертеров / П.С. Харлашин, А.А. Ларионов, А.К. Харин, Н.О. Чемерис // Новые огнеупоры. – 2010. – №7. – С. 5-9.
2. Пицида В.И. О механизме износа периклазоуглеродистых огнеупоров в конвертере / В.И. Пицида, Б.М. Бойченко, М.С. Тарнавский // Metallurgical and Mining Industry. – 2003. – №8. – С. 98-101.
3. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфёнов, А.В. Сигалов. – М: Высшая школа, 1990. – 207 с.

#### Bibliography:

1. Theory and practice of flaring shotcrete lining 160 t oxygen converters / P.S. Kharlashin, A.A. Larionov, A.K. Kharin, N.O. Chemeris // New refractories. – 2010. – №7. – P. 5-9. (Rus.)
2. Pitsida V.I. B.M. Boitchenko, M.S. Tarnavskii. On the mechanism of wear of magnesia refractories in the converter / V.I. Pitsida, B.M. Boitchenko, M.S. Tarnavskii // Metallurgical and Mining Industry. – 2003. - №8. – P. 98-101. (Rus.)
3. Dulnev G.N. The use of computers for solving problems of heat transfer / G.N. Dulnev, V.G. Parfenov, A.V. Sigalov. – Moscow: Graduate School, 1990. – 207 p. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.05.2014