

**Заключение.** Рассмотрены различные подходы анализа теплопереноса в слое пористого материала в виде металлошихты. Показано, что при высокой температуре, большой пористости металлошихты и длительном времени нагрева происходит некоторое выравнивание температуры за счет внутреннего теплопереноса в слое, что необходимо учитывать при моделировании процессов подогрева металлошихты.

## Литература

1. **Теплотехнология** металлургических мини-заводов / В.И. Тимошпольский [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1992. – 158 с.
2. **Болотов, В.Ю.** Трехмерная математическая модель тепловой работы ДСП по технологии высшего уровня / В.Ю. Болотов // Энергетика. – 2002. – № 1. – С. 33–37.
3. **Павлюкевич, Н.В.** Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н.В. Павлюкевич. – Минск: ИТМО НАНБ, 2002. – 140 с
4. **Казанцев, Е.И.** Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
5. **Металлургические печи.** Теория и расчеты: Учебник. В 2 т. Т.1 / В.И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 596 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 ШАХТНОГО ПОДОГРЕВА МЕТАЛЛОШИХТЫ\*

В зависимости от производственных условий схемы подогрева металлошихты можно разделить на несколько случаев:

1) вертикальная или наклонная шахта с плотным заполнением и неподвижным слоем (схема характерна для шахтных печей с удерживающими пальцами);

2) шахта с плотным заполнением и непрерывным движением металлошихты (шахтные печи с толкателями);

3) горизонтальная или наклонная шахта с неполным заполнением. Схема характерна для нагрева лома в корзинах совкового (лоткового) типа и конвейерного подогрева. Поток газов разделяется на поток, проходящий в слое металлошихты и в свободном сечении шахты;

4) цилиндрическая или прямоугольная шахта малой высоты со струйным нагревом слоя горелками, в том числе и конвейерные тоннели с горелками.

Для отдельных установок подогрева, применяемых на практике, также возможны комбинации рассмотренных случаев.

### **Погрешности, возникающие при моделировании подогрева металлошихты**

При моделировании нагрева металла выбор конкретной модели зависит от точности получаемых результатов и цели исследования нагрева. Для минимизации погрешностей анализируют причины их возникновения: излишнее упрощение или усложнение на этапе физического моделирования; недостаточность информации о свойствах объектов; ошибки, допущенные при написании модели; погрешность расчетной программы. Выбор размерности задач определяется комплексом факторов, основными из которых являются приемлемая точность и трудоемкость решения (затраты на построение модели и использование компьютерных ресурсов) [1]. В процессах нагрева металлошихты в большинстве случаев справедливо задание граничных условий III-рода.

Основным критерием выбора размерности задачи является отношение конечной температуры нагрева объекта  $T_0$  к температуре среды теплоносителя  $T_T$  ( $K_{T_0} = T_0/T_T$ ). Например, уровни погрешности расчета температуры центра призматического объекта с сечением в виде квадрата при понижении размерности задачи 3D→1D для граничных условий III-рода при  $Bi = 1$  и  $n = 1$  в случае его нагрева до температуры, равной половине температуры среды и 90 % температуры среды ( $K_{T_0} = 0,5$  и  $K_{T_0} = 0,9$ ), различаются более чем в три

раза. В первом случае относительная погрешность составляет 0,375, а во втором – 0,1 [1].

Вторым критерием, влияющим на уровень погрешности и выбор размерности задачи, является критерий соотношений геометрических размеров по осям координат  $K_n = L_i/R$ . Определено, что при отношении длины куска металла к характерному размеру по сечению более 5-ти, можно понижать размерность задачи без существенной потери точности.

Для зависимости погрешности понижения размерности задачи от числа Фурье (времени) характерен максимум, положение которого зависит от критерия Био и соотношения геометрических размеров по осям координат. Это связано с тем, что концы объекта нагреваются быстрее и поток через их поверхность при росте температуры поверхности быстро уменьшается.

Сопоставление результатов моделирования осложняется тем, что модели с определенными граничными условиями основаны на физических параметрах процесса, а не технологических (имеется разброс параметров металлошихты, колебания производительности и т.д.). Как следует из работ [2 и др.] в процессе плавки изменяются как значения температуры газов, так и их количество и состав, поэтому помимо энтальпии газов будут изменяться и скорости их движения в установке подогрева металлошихты, а, следовательно, и коэффициенты теплоотдачи к поверхности металлошихты. Из данных [2] следует, что температура удаляемых газов на протяжении плавки может изменяться от 600 °С до 1200 °С и более.

### **Упрощенные модели нагрева материала в противотоке**

Закономерности распределения температур в противотоке определяются величинами водяных чисел потоков  $W$  (Вт/К), которые представляют собой произведение расхода потока вещества  $G$  на удельную теплоемкость  $c$  этого вещества  $W = G \cdot c$ . Водяной эквивалент потока газа в дальнейшем обозначим  $W_{\Gamma}$ , а материала (шихты) –  $W_M$ .

Рассмотрим случай, когда  $W_{\Gamma} > W_M$ . При условии завершения теплообмена шихта отбирает от газа практически всю возможную теплоту, нагреваясь до температуры поступающих в слой газов  $t_0$  [3].

Для частиц, представляющих собой термически тонкие тела при завершенности теплообмена, конечная температура металла достигает начальной температуры газов  $t''_M = t'_G$ .

Тогда конечную температуру газов можно определить по формуле

$$t''_G = (W_G - W_M) / W_G \cdot (t'_G - t'_M). \quad (1)$$

Это выражение можно использовать для практических целей с поправками. Если действительная температура газа в конце шахты оказывается больше расчетной, то это значит, что действительная температура металла будет меньше расчетной и имеется значительный градиент температуры по сечению кусков лома.

Состав газов и их температуру на современных электродуговых печах контролируют различными способами, при этом данная операция возможна в режиме реального времени [2]. При наличии возможности измерения расхода газов и температур газов до и после установки определение действительной среднemasсовой температуры возможно на основе теплового баланса

$$Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (t''_M - t'_M) \cdot \tau = V_G \cdot c_{G1} \cdot t'_G \cdot \tau - (V_G + \Delta V) \cdot c_{G2} \cdot t''_G \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $\Delta V$  – объем подсосов воздуха в шахту.

При непрерывном движении металлошихты в установке изменение относительной температуры шихты можно определить [3] по выражению:

$$\Theta_M = \frac{t_M - t_{нач}}{t_0 - t_{нач}} = 1 - \exp \left[ - \frac{k_v}{c_M} \cdot \left( 1 - \frac{W_M}{W_G} \right) \cdot \frac{H}{w_M} \right], \quad (3)$$

где  $t_M, t_{нач}$  – текущая и начальная температура шихты, °С;  $t_0$  – начальная температура газов, °С;  $k_v$  – суммарный объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $c_M$  – теплоемкость насыпного 1 м<sup>3</sup> шихты, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $H$  – положение сечения слоя, считая от места загрузки шихты, м;  $w_M$  – скорость движения шихты, м/ч.

Рассмотрим случай, когда  $W_{\Gamma} < W_{\text{M}}$ . Газовый поток отдает практически всю свою теплоту шихте и охлаждается до начальной температуры. Конечная температура металла

$$t_{\text{M}}'' = W_{\Gamma} / W_{\text{M}} \cdot t_{\Gamma}' . \quad (4)$$

Нами ранее были рассчитаны параметры отходящих газов при использовании различных технологий плавки в 100-т электродуговых печах Белорусского металлургического завода.

Для предварительной оценки конечной среднemasсовой температуры подогрева можно воспользоваться приведенной выше формулой (4). Например, при суммарном количестве газов с учетом подсосов воздуха, покидающих рабочее пространство электродуговой печи, равном 14000 м<sup>3</sup>/ч, получим:

$$W_{\Gamma} = G \cdot c = 14000 / 3600 \cdot 1620 = 6300 \text{ Вт/К}.$$

Количество металлошихты, которое необходимо нагреть за время плавки, равное 1 ч, составляет 120 т. Принимая, что нагрев осуществляется при непрерывном движении в шахтной печи, получим:

$$W_{\text{M}} = G \cdot c = 120000 / 3600 \cdot 700 = 23333 \text{ Вт/К}.$$

Тогда максимальная (без учета тепловых потерь) конечная среднemasсовая температура металла при температуре газов 1500 °С составит:

$$t_{\text{M}}'' = 6300 / 23333 \cdot 1500 = 405 \text{ °С}.$$

Данная температура показывает, что при конкретной технологии плавки (количество окисляемого углерода, расход вдуваемого кислорода, количество вводимых углеродсодержащих материалов, расход природного газа и т.д.) энтальпии покидающих рабочее пространство газов может быть недостаточно для высокотемпературного подогрева лома.

При определении коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в процессе моделирования подогрева шихты (при анализе слоевых

процессов) удобно пользоваться объемным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К) вместо поверхностного.

Суммарный коэффициент теплопередачи  $k_v$ , учитывающий как внешнее, так и внутреннее тепловые сопротивления, определяют по формуле:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{d_M^2}{A \cdot (1-f) \cdot \lambda_M}}, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad (5)$$

в которой числовой коэффициент  $A$  принимается равным 75 для кусков произвольной формы, а  $\lambda_M$  – теплопроводность частиц [3].

Значение  $\alpha_v$  можно использовать по аналогии с условиями работы шахтных печей и представленного в работе [3].

Объемный коэффициент теплоотдачи также использовали в работе [4] при расчете прогрева металлошихты при ее нагреве и плавлении в электродуговой печи. В этом случае объемный коэффициент теплоотдачи определяли по формуле:

$$\alpha_v = 6 \cdot (1 - \varepsilon) / d_s^2 \cdot \lambda_g \cdot (2 + 1,1 \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}^{0,6}) \quad (6)$$

где  $d_s$  – эквивалентный диаметр твердой частицы, м;  $\varepsilon$  – пористость

### **Математическая модель нагрева металлошихты при продувке ее газами**

Упрощенные модели подогрева металлошихты не позволяют учесть переменное количество газов и их температуру, а также исследовать влияние вида лома (разные размеры кусков и насыпная плотность), поэтому была разработана модель нагрева металлошихты в шахте газами, расчетная схема которой приведена на рисунке 1.

Исходными данными для исследований являются размеры куска лома, насыпная плотность лома, масса и температура, а также вид газа, его количество и температура.

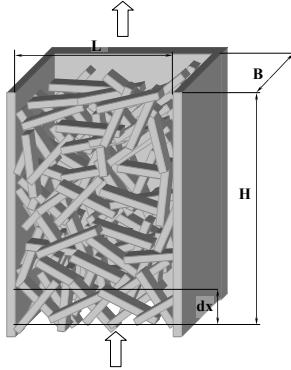


Рисунок 1 – Расчетная схема нагрева металлошихты в шахте

Для исследования влияния вида металлошихты на эффективность ее предварительного подогрева удаляемыми из печи газами модель включает задачу сопряженного теплообмена между кусками металлошихты и удаляемыми из печи газами и внутреннюю задачу теплопроводности:

$$\rho_{\text{нас}} \cdot c_p \cdot S_k \cdot dz \cdot \frac{dT_M(z)}{d\tau} = \alpha(z) \cdot (T_g(z) - \bar{T}_s(z)) \cdot dF ;$$

$$c_{p\_g} \cdot G_g \cdot dT_g = \alpha(z) \cdot (T_g(z) - \bar{T}_s) \cdot dF ;$$

$$\rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) ; \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(z) \cdot [T_g(x) - \bar{T}_s] ;$$

$$T(\tau = 0) = T_{M0} = \text{const} ; \quad T_g(z = 0) = T_{g0} = f(\tau) ,$$

где  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность металлошихты;  $c_p$ ,  $c_{p\_g}$  – соответственно, теплоемкость металлошихты и газов;  $S_k$  – площадь сечения шахты;  $\alpha(z)$  – коэффициент теплоотдачи от газов к поверхно-

сти кусков металлошихты;  $T_m$ ,  $T_g$ , – соответственно, температура металла и газа;  $\bar{T}_s(z)$  – средняя температура поверхности металла;  $G_g$  – массовый расход газа.

Для приближенных расчетов коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k(z)$  можно принять по аналогии с регенеративной насадкой в клетку [5]. В.Н. Тимофеев и С.П. Каштанова исследовали коэффициенты теплоотдачи для 16 типов форм насадок воздухонагревателей, отличающихся наличием турбулизирующих элементов (горизонтальных проходов и выступов), что приводило к увеличению значений коэффициентов теплоотдачи на 15–20 % и несколько большему увеличению коэффициентов гидравлических сопротивлений.

Учитывая беспорядочную структуру металлозавалки, для дальнейших расчетов можно принять:

$$\alpha_k(z) = 1,2 \cdot 8,7 \cdot \frac{w^{0,5}}{d^{0,33}} = 10,5 \cdot \frac{w^{0,5}}{d^{0,33}}, \quad (8)$$

где  $w$  – скорость движения газов в насадке (в металлозавалке), м/с;  $d$  – гидравлический диаметр каналов, м.

Коэффициент теплоотдачи в общем случае определяем из критериального соотношения

$$\alpha(x) = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{C \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \lambda}{d}. \quad (9)$$

Для относительно мелкой металлошихты для вычисления коэффициента теплоотдачи также можно использовать формулу В.Б. Щербатского:

$$Nu_{\perp} = [0,31 - 0,3 \cdot \exp(-0,0076 \cdot Re_{\perp})] \cdot Re_{\perp}^{n+0,66 \cdot \exp(-0,0175 \cdot Re_{\perp})}. \quad (10)$$

В формуле (10) в качестве определяющих параметров при расчете локальных чисел  $Nu_{\perp}$  и  $Re_{\perp}$  приняты эквивалентный диаметр куска и локальная скорость газа в слое. Величина  $n$  для слоя шероховатых частиц неправильной формы равна 0,67, а для шарообразных частиц 0,625. Эта формула получена путем обобщения результатов



большого числа экспериментальных данных различных исследователей.

Алгоритм расчета нагрева лома проходящими через слой газами:

1) исходя из насыпной плотности и массы, определяем объем, занимаемый ломом, а исходя из поперечных размеров шахты, находим высоту слоя металлошихты:

$$H = \frac{m}{\rho_{\text{нас}} \cdot S};$$

2) определяем среднюю массу куска лома и площадь его поверхности;

3) делим высоту слоя металлошихты на определенное количество участков и получаем на каждом расчетном участке массу  $m_x$ , площадь поверхности лома  $F_x$ ;

4) определяем скорость движения газов и коэффициент теплоотдачи к поверхности лома:

$$v'_g = \frac{v_g}{P} = \frac{G_v}{S \cdot P},$$

где  $v_g$  – скорость газа в открытом сечении шахты до слоя металлошихты при температуре газа  $t$ , м/с;  $P$  – пористость металлошихты;  $G_v$  – объемный расход газов в шахте, м<sup>3</sup>/с.

В случае радиационно-конвективного теплообмена при высоких температурах продуктов сгорания  $\alpha(x) = \alpha_k + \alpha_p$ ;

5) решаем уравнение теплопроводности для куска лома в двумерной постановке и определяем зависимость среднего теплового потока через поверхность куска  $\bar{q}(\tau)$  от времени и средний тепловой поток за промежуток времени  $\bar{q}_1$ ;

6) определяем теплоту, переданную лому от газа (чем больше длина куска, тем меньше ошибка):

$$Q_{scr}(\tau) = \bar{q}(\tau) \cdot k_d \cdot F_x, \text{ Вт};$$

$$Q_{scr1} = \bar{q}_1 \cdot k_d \cdot F_x \cdot \tau, \text{ Дж},$$

где  $k_d$  – коэффициент, учитывающий переход от решения трехмерной задачи к двумерной;

7) определяем температуру газа:

$$T_g''(\tau) = \frac{(c'_{p-g} \cdot G \cdot T_g' - Q_{scr})}{c''_{p-g} \cdot G}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

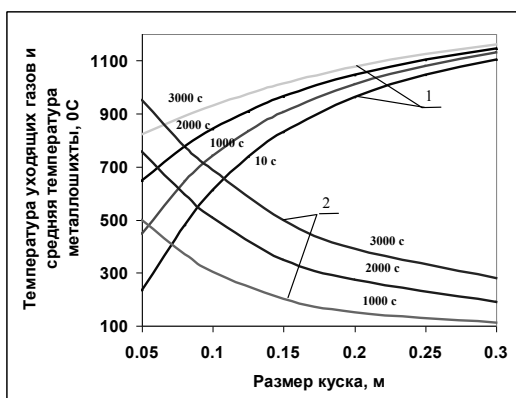
8) определяем среднюю температуру лома:

$$T_{scr}'' = T_{scr}' + \frac{Q_{scr1}}{c_p \cdot m_x}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

9) повторяем пункты 4–8 для последующих участков.

В качестве начальной температуры газа на последующем участке принимаем температуру газа на предыдущем.

При использовании разработанной модели было исследовано влияние размеров кусков лома на среднемассовую температуру подгрева металлошихты. Зависимость температуры подгрева лома от среднего размера куска металлошихты при постоянной температуре удаляемых из печи газов, равной 1400 °С, представлена на рисунке 2.



1 – температура уходящих газов; 2 – средняя температура металлошихты  
 Рисунок 2 – Зависимость температуры подгрева лома от среднего размера куска металлошихты при постоянной температуре удаляемых из печи газов равной 1400 °С

Как следует из графика, приведенного на рисунке 2, при указанных исходных данных металлошихта за время 50 мин нагревается до среднемассовой температуры выше 900 °С только в случае кусков с толщиной менее 0,06 м. Для толщин кусков, близких к 0,3 м, среднемассовая температура не превышает 300 °С. Температура газов на выходе из шахты все еще достаточно высока и изменяется от 800 °С до 1100 °С в зависимости от средних размеров кусков.

Для учета потерь с охлаждающей водой при использовании водоохлаждаемых панелей физико-математическую модель целесообразно дополнять условием охлаждения газа на каждом элементарном участке в зависимости от расхода воды, термического сопротивления передаче от газов к воде через металлическую стенку и площади водоохлаждаемых стен.

В работе [6] приведены сведения о результатах проведения экспериментов по нагреву лома с различной насыпной плотностью (600–1100 кг/м<sup>3</sup>) в шахтной системе подогрева UL-BA. Отмечается, что в процессе подогрева металлошихты в шахте может происходить частичное оплавление кусков, а также показано, что при использовании водоохлаждаемых панелей ломом поглощается только 44 % теплоты газов, 38 % теряется с охлаждающей водой, а 18 % – с отходящими газами.

Необходимо отметить, что предложенная физико-математическая модель также позволяет использовать любую зависимость температуры газов на входе в шахту от времени. Так, например в реальных условиях эксплуатации печи температура уходящих газов изменяется от 600 °С до 1600–1700 °С в период продувки, причем при дожигании СО возможно повышение температуры до 1800 °С и более.

На рисунке 3 показаны результаты расчета при увеличивающейся во времени от 800 °С до 1600 °С в течение 50 мин температуре газов.

Состав газов и их температуру на современных электродуговых печах контролируют различными способами, при этом данная операция возможна в режиме реального времени [2].

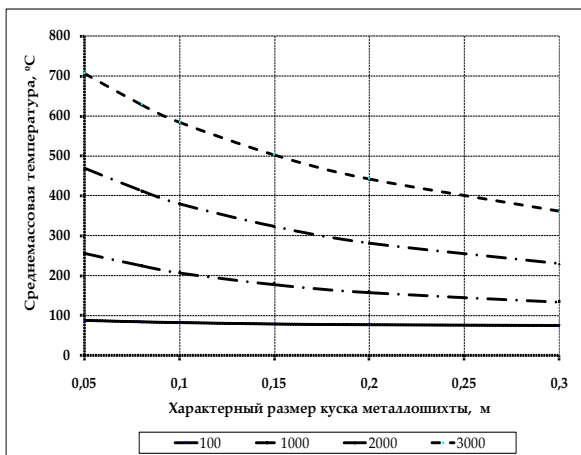


Рисунок 3 – Зависимость температуры подогрева лома от среднего размера куска металлошхты при изменяющейся температуре удаляемых из печи газов

На рисунках 4 и 5 показана зависимость температуры газов от размера куска металлошхты, а также распределение температуры газов по высоте шахты в различные моменты времени.

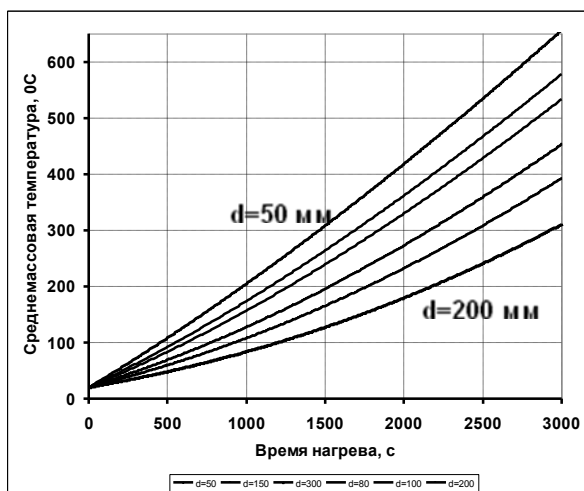


Рисунок 4 – Зависимость среднемассовой температуры металлошхты от времени ее нагрева в шахте ДСП

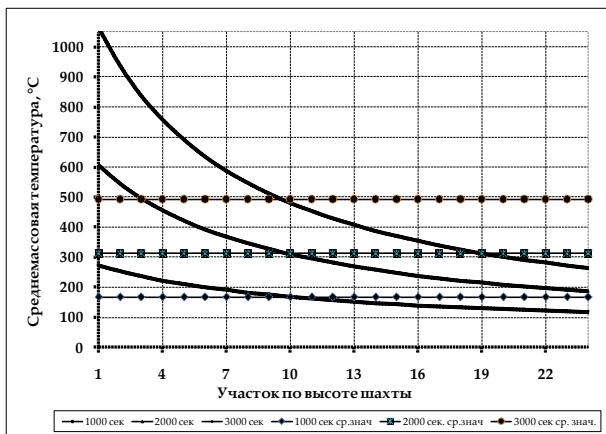


Рисунок 5 – Распределение средней температуры металлошихты по высоте шахты и средняя температура подгрева в различные моменты времени для кусков размером 0,15 м

Данные зависимости показывают, что при нагреве металлошихты за счет удаляемых из печи газов эффективность подгрева будет зависеть как от времени подгрева, так и от геометрических характеристик металлошихты.

**Оценка аэродинамического сопротивления слоя подгреваемой металлошихты.** Потери давления при прохождении слоя металлошихты высотой  $H_{сл}$  определим по формуле [5]:

$$\Delta P_H = \zeta_H \cdot H_{сл} \cdot \frac{W_t^2}{2} \cdot \rho_t, \quad (11)$$

где  $\zeta_H = \frac{1,57}{d_3^{0,25}}$  – коэффициент сопротивления на 1 м пути газа, полу-

лученный для регенеративных насадок со смещенными каналами – насадки Сименса [5] (конфигурация данной насадки наиболее соответствует геометрическим характеристикам применяемой металлошихты);  $d_3$  – эквивалентный диаметр ячейки, м;  $H_{сл}$  – высота слоя,

м;  $W_t = \frac{W_0}{\varepsilon} \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right)$  – действительная скорость газа в каналах

между кусками металлошихты с учетом ее пористости и температуры газов, м/с;  $W_0$  – скорость газа при нормальных условиях, м/с;  $t$  – температура газов, °С;  $\varepsilon$  – пористость металлошихты;  $\rho_t$  – плотность газа при температуре  $t$ , кг/м<sup>3</sup>.

В связи с тем, что при осуществлении мероприятий по энерго-сбережению необходимо учитывать все возможные потери энергии, оценим влияние подогрева металлошихты в шахте ДСП на потребление электрической энергии системой удаления газов из печи. В качестве исходных данных принимаем данные по гидравлическому режиму печи ДСП-100 и условие о том, что данный режим (а, следовательно, и эффективность удаления пыли и газов из печи) не должен измениться при наличии шахты с металлошихтой.

Охлаждение газов в основном осуществляется за счет многократного разбавления холодным воздухом, и при количестве удаляемых из печи газов, составляющем 15–25 тыс. нм<sup>3</sup>/ч, количество газов, приходящих к вентиляторам системы газоудаления, может составлять 600–700 тыс. нм<sup>3</sup>/ч. Для условий применения шихты с насыпной плотностью 800–2500 кг/м<sup>3</sup>, площади сечения шахты 9 м<sup>2</sup> и массы 50 т, получим перепад давления в слое металлошихты  $\Delta p = 20$ –60 Па, что соответствует изменению мощности дымососа  $N = 3,4$ –10,2 кВт или в сравнении с номинальной мощностью дымососа, равной 1500 кВт, получаем не более 0,7 %.

Расчеты также показывают, что при изменении размеров (сечения) шахты прирост мощности потребляемой системой газоочистки может изменяться от 0,5 % до 50 % в зависимости от сечения шахты.

При уменьшении площади сечения шахты и соответственно увеличении высоты слоя, а также увеличении массы завалки сопротивление будет существенно возрастать, а изменение потерь мощности аэродинамической системы может превысить 50 % от номинальной мощности вентиляторов системы газоочистки. Это связано с тем, что при уменьшении линейных размеров шахты, при постоянном объеме удаляемых из печи газов, и скорость, и высота слоя увеличиваются в квадратичной зависимости, а, кроме того, формула для сопротивления (11) также содержит квадрат скорости.

**Заключение.** Рассмотрены различные способы моделирования шахтного нагрева металлолома, их достоинства и недостатки. Показано, что энтальпия газов, используемых для подогрева металлошихты, может быть недостаточной для высокотемпературного подогрева, однако это позволяет использовать упрощенные модели нагрева. Сформулированы модель и алгоритм расчета нагрева металлошихты за счет теплоты удаляемых из печи газов, учитывающие геометрические характеристики металлошихты и изменяющиеся в процессе работы печи температуру и объем газов, входящих в шахту.

### Литература

1. **Корнеев, С.В.** Область применения одно-, двух- и трехмерных моделей нагрева и охлаждения / С.В. Корнеев // Весці НАН Беларусі: в 4-х ч. Ч. 3.– Минск: Беларус. навука, 2008. – С. 318–402.
2. **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.
3. **Зобнин., Б.Ф.** Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин., М.Д. Казяев, Б.И. Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
4. **Математическая модель** и численный алгоритм расчета нагрева и плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи / Ю.А. Станкевич [и др.] // Доклад на 6-м Минском Международном форуме по тепломассообмену. – Минск, 2008.
5. **Металлургические печи.** Теория и расчеты: Учебник. В 2 т. Т.1 / В.И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Беларус. навука, 2007. – 596 с.
6. **New scrap preheating system for electric arc furnace (UL-BA)** / Nakano Hiroaki, Uchida Sihjiro, Arita Koji, Kuroda Hitoshi // 6<sup>th</sup> Eur. Elec. Steelmak. Conf., Dusseldorf, June 13–15, 1999: Proc. – Dusseldorf, 1999. – P. 84–90.