

УДК 669.187.046.7.001.573

Е.Н. Яловая, И.А. Павлюченков, В.Ю. Болотов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ  
ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ЦЕЛЬЮ  
РАЗРАБОТКИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАВЛЕНИЯ  
МЕТАЛЛОШИХТЫ**

**Постановка проблемы**

В мировом производстве стали наблюдается неуклонный рост доли электросталеплавильного производства, это обусловлено тем, что оно отличается более низкими показателями энергоемкости, количествами сырьевых материалов и выбросов в окружающую среду, а так же гибкостью использования различных видов шихтовых материалов. Дефицит электрической энергии и ее относительно высокая стоимость, вызывает необходимость поиска новых технических решений при создании новых и модернизации действующих ДСП, применение альтернативных источников теплоты, совершенствование существующих технологических процессов для снижения удельного расхода топлива. Поэтому оптимизация теплотехнических процессов в дуговых печах с учетом снижения энергопотребления и сокращение продолжительности плавки является важной и актуальной задачей при проведении экспериментальных и теоретических исследований.

**Анализ публикаций по теме исследования**

Математическому моделированию теплофизических процессов в дуговых сталеплавильных печах посвящен весьма ограниченный перечень работ. Основной целью математического моделирования у таких авторов, как: Егоров А.В., Игнатов И.И., Тимошпольский В.И. является определение продолжительности расплавления металлошихты в зависимости от энергетического режима печи. Моделирование тепловой работы ДСП с учетом особенностей протекания стадии проплавления колодцев произведено авторами Попов Н.Н, Моржин А.Ф. Однако не создано комплексной математической модели, учитывающей все факторы, влияющие на ход плавления шихты: насыпные характеристики шихты,

конвективный подогрев отходящими печными газами, выделение теплоты экзотермических реакций, теплоты при продувке кислородом в окислительный период. Не установлено влияние технологических режимов работы газокислородных горелок, их количества и мощности; интенсивность перемешивания жидкой металлической ванны при донном перемешивании диспергированным аргоном; влияние массы оставшегося жидкого металла от предыдущей плавки на динамику расплавления шихты в печи.

### **Формулирование целей статьи**

На основе анализа предметной области было установлено, что разработка оптимальных режимов и усовершенствование технологий невозможны без наличия математической модели тепловой работы ДСП. Целью работы авторов является разработка универсальной математической модели процесса плавления металлошихты, с учетом особенностей современных технологий выплавки стали в ДСП: переменной тепловой мощности электрической дуги, интенсификации подогрева металлошихты за счет теплоты газокислородных горелок (в зависимости от их количества и расположения), теплоты экзотермических реакций при окислении элементов, конвективного нагрева шихты печными газами. Так же актуальным вопросом является разработка эффективного метода, алгоритма и программы для расчета на ЭВМ теплового состояния в рабочем пространстве ДСП. В соответствии с полученными результатами требуется промышленная апробация в промышленных условиях при разработке оптимальных энергосберегающих режимов плавления шихты.

### **Основная часть**

При моделировании тепловой работы ДСП условно выделяют четыре стадии: зажигание электрических дуг, проплавление колодцев, плавление закрытыми дугами, доплавление шихты открытыми дугами. При создании математической модели кинетики плавления шихты учитываются особенности протекания теплофизических процессов на каждой стадии работы печи. Каждая из стадий работы ДСП характеризуется температурой футеровки стен, пода, свода, шихты и болота, количеством печных газов в атмосфере печи, интенсивностью протекания экзотермических реакций и

скоростью конвективного нагрева шихты. Для примера рассмотрим второй этап тепловой работы ДСП – проплавление колодцев.

Схема расчетной области данного периода представлена на рис.1.

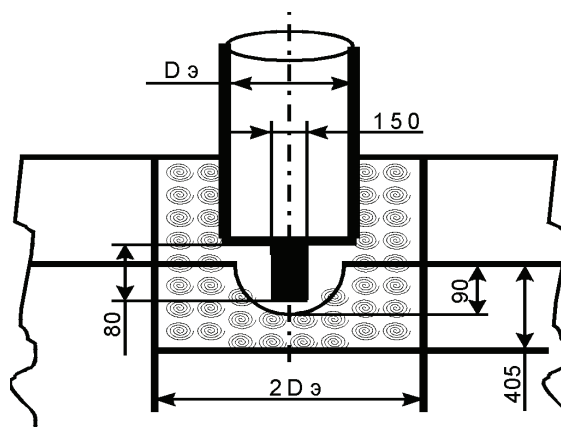


Рисунок 1 - Схема горячего пятна

Распределение температуры в объеме «болота» на данном этапе описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} \frac{\partial T_{\text{б}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{б}} r \frac{\partial T_{\text{б}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_{\text{б}} \frac{\partial T_{\text{б}}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\text{б}} \frac{\partial T_{\text{б}}}{\partial z} \right), 0 < z < Z_{\text{б}} \quad (1)$$

где здесь и в дальнейшем  $r, \varphi, z$  – координаты в цилиндрической системе координат  $0 < r < Rn$ ;  $0 < \varphi < 2\pi$ ;  $Rn$  – радиус печи;  $T_{\text{б}} = f(r, \varphi, z, \tau)$  – температура «болота» (0С);  $c_{\text{б}} = f(T_{\text{б}})$ ,  $\lambda_{\text{б}} = f(T_{\text{б}})$ ,  $\rho_{\text{б}} = f(T_{\text{б}})$  – массовая теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность «болота».

Распределение температур в объеме шихты описывается уравнением:

$$c_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{ш}} r \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right) + Q_{\text{гор}}, \quad (2)$$

$$Z_{\text{б}} < z < Z_{\text{ш}}, \quad \tau_1 < \tau < \tau_2$$

где  $Q_{\text{гор}}(r, \varphi, z, \tau)$  – теплота, подводимая к шихте в результате работы топливно-кислородных горелок;  $\tau_2$  – время окончания второго периода.

Начальным условием для этих уравнений в рассматриваемом периоде является поле температуры для «болота»  $T_{\text{б}}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1)$  и шихты  $T_{\text{ш}}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1)$ , полученное в результате решения задачи теплопроводности на предыдущем этапе. На оси симметрии печи задано условие симметрии. На поверхности соприкосновения шихты

с футеровкой стен печи или пода заданы граничные условия IV рода. На границах "болото" – шлак, шлак – шихта заданы граничные условия IV рода. В зоне пятна дуги (на подвижной границе дна колодца) на поверхности шихты задано граничное условие радиационного теплообмена:

$$-\lambda_{ш} \left. \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \right|_{z=Z_{ki}(\tau)} = \varepsilon_{np1} \sigma_0 \left( (T_{дуги} + 273)^4 - (T_{ш}(z=Z_{ki}(\tau)) + 273)^4 \right) \quad (3)$$

где  $i=1,2,3$  - номер колодца;  $Z_{ki}(\tau)$  - координата поверхности  $i$ -того колодца;  $\varepsilon_{np1}$  - приведенная степень черноты системы «шихта – дуга».

На верхней поверхности шихты  $G_{sh}$  ( $z=Z_{ш}$ ) задано условие лучистого теплообмена в результате поглощения лучистой энергии, излучаемой сводом:

$$-\lambda_{ш} \left. \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \right|_{z=Z_{ш}(\tau)} = \varepsilon_{np2} \sigma_0 \left( (T_{св} + 273)^4 - (T_{ш}(z=Z_{ш}(\tau)) + 273)^4 \right) \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{np2}$  - приведенная степень черноты системы «шихта – свод»;  $T_{св}$  - температура свода.

В выражениях 3 и 4 значение степеней черноты определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{np1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{ш}} + \frac{1}{\varepsilon_{дуги}} - 1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{np2} = \frac{\varepsilon_{ш} \varepsilon_{св} (1 - \varepsilon_0)}{B}, \quad (6)$$

где  $B = -\varphi_{12} \varphi_{21} (1 - \varepsilon_0)^2 (1 - \varepsilon_{ш})(1 - \varepsilon_{св})$ .

Теплота горелок учитывается в модели введением в уравнение теплопроводности для объема шихты объемного источника  $Q_{гор}(r, \varphi, z, \tau)$ , ( $i=1,2,3$  - число горелок).

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Расчет процесса расплавления металлошихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи производится путем последовательного расчета теплового состояния на каждой отдельной стадии тепловой

работы печи. Трехмерные уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями для отдельных стадий расплавления металлошихты заменяются неявными конечно-разностными отношениями на основании метода контрольного объема. Расчет теплообмена излучением на различных стадиях тепловой работы печи между участвующими в теплообмене поверхностями производится зональным методом. В расчетах не учитывалось перемещение жидкого «болота», то есть принято равенство нулю компонент скорости. Исследование влияния интенсивности перемешивания «болота» на кинетику плавления металлошихты планируется в последующих работах.

Параметрическую идентификация математической модели и расчетного алгоритма проводили путем настройки параметров по опытно-промышленным плавкам ДСП-3 Белорусского металлургического завода. При этом невязка баланса составила 0,7-2,5%.

Проведен вычислительный эксперимент по исследованию кинетики плавления металлошихты в рабочем пространстве ДСП. Исследовалась кинетика плавления шихты от тепла электрических дуг и от тепла дуг с применением газокислородных горелок. Сделан вывод о возможности снижения расхода электрической энергии на 8-10% и продолжительности расплавления на 7-9% путем использования альтернативной энергии газокислородных горелок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: А.В.Егоров. – М: МИСИС., 2000. – 271с.
2. Расчет нагревательных и термических печей / В.М. Тымчак, В.Я. Гусовский, - М.: Металлургия, 1983.
3. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.Б. Стеблов, И.А. Павлюченков - Минск, Высшая школа, 1992. -217с.
4. Математические модели теплообмена в ДСП / И.И. Игнатов. – Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. Сборник научных трудов // ВНИИЭТО, 1983, с. 17-19.
5. Попов Н.Н, Моржин А.Ф. Математическое моделирование и расчет проплавления колодцев в ДСП// Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. – Сб. науч. тр. ВНИИЭТО.- М.: Энергоиздат, 1983. - С17-19.

Получено 20.03.2008 г.