

Температурное поле шлака при его охлаждении

Костылева Алина Алексеевна

Научный руководитель Н.Н. Синицын

Череповецкий государственный университет

Увеличение производительности цехов по переработке шлаков сталеплавильного производства сдерживается производительностью существующих шлаковых полей. Для процессов термодробления необходимо, чтобы жидкий шлак перешел в твердое состояние. Для этого шлак заливается водой. С целью снижения расхода воды и повышения эффективности процесса охлаждения необходимо исследование температурного поля жидкого шлака при его охлаждении. При этом в зимний период из-за охлаждения шлака водой (по технологии) происходит сильное запарение. Снижение видимости при выполнении технологических операций персоналом создает угрозу травмирования. Поэтому задача исследования температурного поля при охлаждении шлака является актуальной, позволяя эффективно охлаждать шлак и подбирать оптимальный расход воды, чтобы не было запаривания. Процесс охлаждения необходимо проводить при температуре поверхности слоя шлака, меньшей температуры кипения воды. Жидкий шлак имеет температуру T_0 . В начальный момент времени на поверхности шлака внезапно устанавливается некоторая температура T_c , которая меньше температуры кипения воды, и при всех изменениях всегда ниже температуры фазового перехода жидкого шлака T_ϕ . В результате образуется затвердевший слой шлака переменной толщины. Нижняя подвижная граница его всегда имеет температуру фазового перехода. На этой границе происходит переход из одного агрегатного состояния в другое, на что требуется теплота фазового перехода L , Дж/кг. Таким образом, верхняя граница ($x=\xi$) жидкой фазы имеет постоянную температуру затвердевания, а нижняя граница ($x=l$) – некоторую постоянную температуру жидкого шлака на большой глубине. Нижнюю границу жидкой зоны принимаем лежащей бесконечно глубоко ($l=\infty$). Коэффициенты переноса твердой и жидкой зон

различны. Предположим, что перенос теплоты в шлаке происходит только вследствие теплопроводности.

При увеличении температурного напора тепловой поток проходит через максимум. Максимуму теплообмена предшествует конвективная область, соответствующая малым перегревам жидкости, и область развитого кипения. Между ними находится область неустойчивого кипения. Она характеризуется малой плотностью центров парообразования. Пройдя максимум, плотность постепенно снижается по мере вытеснения пузырькового кипения пленочным. После переходной области наступает режим устойчивого пленочного кипения. В этом режиме лучистый перенос теплоты относительно невелик, а затем он приобретает существенное значение. Аналогично коэффициент теплоотдачи α изменяется от перегрева жидкости. Однако при пленочном кипении увеличение α существенно меньше, чем увеличение плотности теплового потока q .

Таким образом, задачу математически можно сформулировать так (рис. 1; индекс «1» относится к твердой зоне, индекс «2» – к жидкой зоне):

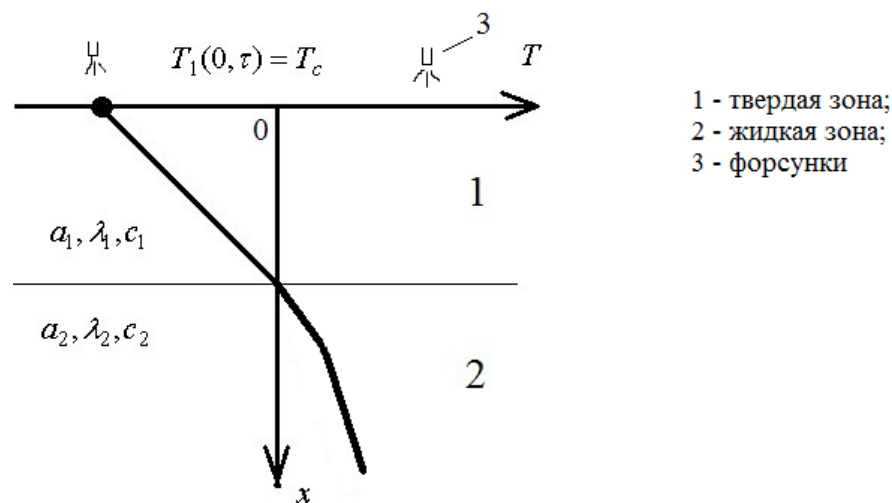


Рис. 1. Распределение температуры при затвердевании шлака

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, (\tau > 0; 0 \leq x < \xi) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, (\tau > 0; \xi < x < \infty) \quad (2)$$

$$T_2(x, 0) = T_0, \text{ так как } \xi(0) = 0 \quad (3)$$

$$T_1(0, \tau) = T_c \quad (4)$$

$$T_1(\xi, \tau) = T_2(\xi, \tau) = T_{\phi} = const \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_2(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

На границе раздела:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} = L\rho_2 \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (7)$$

где ρ_2 - плотность жидкого шлака. В охлаждаемом шлаке имеются две зоны, изменение температуры в которых описывается уравнениями теплопроводности (1) и (2) и граничными условиями (5) и (6).

Целью моделирования является определение координаты фронта затвердевания и температуры поля в твердой и жидкой частях. Расчет произведем методом сквозного счета[2]. Система (1)-(7) в общем случае может быть решена только численным методом. При использовании метода конечных разностей значение температур определяют в узлах сетки расчетной области (рис.2):

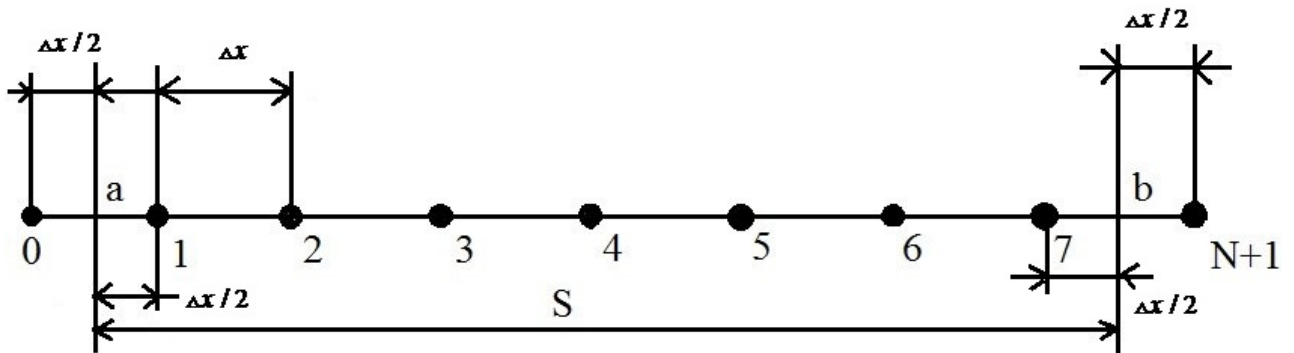


Рис. 2 Схема расчетной области.

Здесь a и b – границы расчетной области, координаты которых находят по формуле $x_i = (i-0,5) \cdot \Delta x$ для дискретных моментов времени $\tau^n = \Delta \tau \cdot n$,

где $i = \overline{0, N+1}$, N – количество узлов внутри расчетной области, 0 и

$N+1$ – номера узлов, находящихся за пределами области на расстоянии $\Delta x/2$;

$\Delta x = S/N$ - расстояние между узлами; $n = 0, (\overline{\tau_k / \Delta \tau})$ - моменты времени ($n = 0$ -

начальный момент времени; $\Delta\tau$ - расчетный шаг по времени).

Температуру в начальный момент времени задают по формуле:

$$T_i = T_i^0 \text{ для } i = \overline{0, N+1}$$

Температуру в фиктивных узлах $i=0$ и $N+1$ в момент времени $n+1$ определяют по формулам:

$$T_0 = \frac{(1-\chi)T_1 + 2\chi T_{ж}}{1+\chi}, \quad \chi = \frac{\alpha \cdot \Delta x}{2\lambda}, \quad T_{N+1} = T_N.$$

Расположение границы фазового перехода материала определяют в поле температур по температуре фазового перехода в цикле по $i = \overline{2...N}$ из условия:

$$\text{если } T_{i-1} \geq T_{\phi} \geq T_i,$$

$$\text{то } \xi = \Delta x(i - \frac{3}{2}) + \Delta x \frac{T_{i-1} - T_{\phi}}{T_{i-1} - T_i}$$

Численное решение при явной схеме аппроксимации является условно устойчивым. В этом случае расчетный шаг определяется по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{(k_y \cdot a)},$$

где $k_y \geq 2$.

Погрешность численного решения будет зависеть от настроечных параметров алгоритма $N=80$, $k_y=2.1$ и $\Delta T=16$. Необходимо выбирать эти параметры таким образом, чтобы погрешность результатов моделирования не превосходила заданную, $\varepsilon < 1\%$.

Для выбора этих параметров выполним тестирование численного решения задачи Стефана путем сравнения с точным решением этой задачи[1], которое известно для граничных условий первого рода.

Таким образом, задача об охлаждении жидкого шлака может быть сформулирована как задача о сопряжении двух температурных полей при наличии особого граничного условия на движущейся границе раздела.

Поэтому решение дифференциальных уравнений (1) и (2) имеют вид[1]:

$$T_1(x, \tau) = T_c + (T_\Phi - T_c) \frac{\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}}{\operatorname{erf} \frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}} \quad (8)$$

$$T_2(x, \tau) = T_0 - \frac{(T_0 - T_\Phi)}{\operatorname{erfc} \frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_2\tau}} \quad (9)$$

Коэффициент β определяется из граничного условия (7), то есть из следующего характеристического уравнения:

$$\frac{\lambda_1(T_\Phi - T_c)}{\sqrt{a_1} \operatorname{erf} \frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_1}\right) + \frac{\lambda_2(T_0 - T_\Phi)}{\sqrt{a_2} \operatorname{erfc} \frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2}\right) = \frac{L\rho_2\sqrt{\pi}}{2} \beta \quad (10)$$

Здесь $\beta = \frac{\xi}{\sqrt{\tau}}$ – коэффициент пропорциональности, характеризующий

скорость углубления зоны затвердевания шлака; τ – время; x – текущая координата; $T_1(x, \tau)$ и $T_2(x, \tau)$ – текущие температуры; a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности; erf и erfc – функции ошибок Гаусса.

Характеристическое уравнение (10) можно решить графическим путем относительно β .

На рисунке 3 представлено распределение температуры в охлаждаемом шлаке в зависимости от коэффициента теплоотдачи. Из рисунка видно, что начиная с некоторого момента времени устанавливается температура поверхности шлака менее 100°C , то есть кипения воды на поверхности шлака не будет.

На рисунке ряд 2: $\alpha=1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ряд 3: $\alpha=3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ряд 4: $\alpha=5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
ряд 5: $\alpha=7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ряд 6: $\alpha=10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ряд 7: $\alpha=12000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

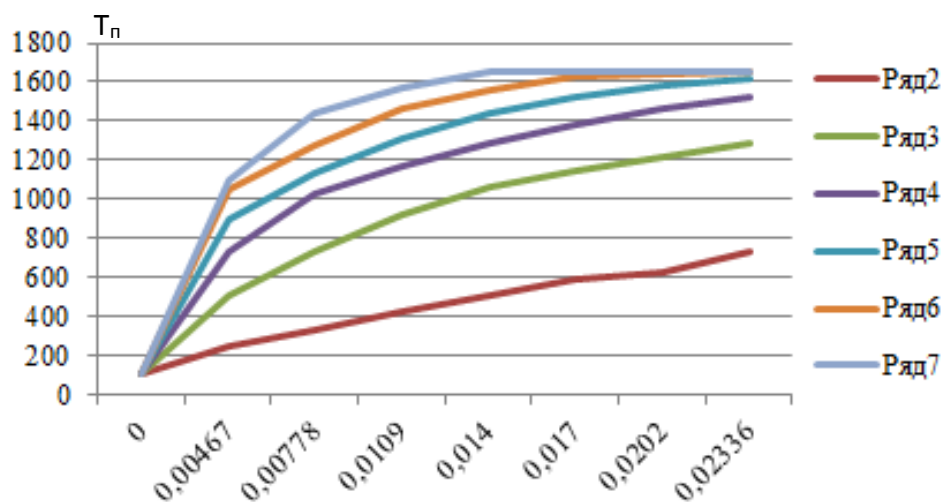


Рис. 3. Влияние коэффициента теплоотдачи на температурное поле охлаждаемого шлака

Таким образом, предложенная математическая модель нестационарного температурного поля позволит исследовать закономерности охлаждения жидкого шлака. При этом можно получить расходные характеристики охлаждающей воды.

Литература

1. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. Учебное пособие для вузов. Высшая школа, М.: 1967г. – 600с;
2. *Синицын Н.Н., Кабаков З.К., Степанова А.В., Малинов А.Г.* Модель замораживания железорудного концентрата. Вестник ЧГУ, №2(47). Т.1. – 2013. – с. 19-22.