

## Анализ нагрева металлической шихты выхлопными газами ГТУ в электросталеплавильном производстве

Гюнтер Д. А., канд. физ.-мат. наук, Бушуев А. Н., инж.

Орский гуманитарно-технологический институт

Получены аналитическая (при постоянных параметрах модели) и численная (с учетом изменения порозности засыпки металла по высоте корзины и переменного характера основных параметров газа и лома в зависимости от температуры) модели теплообмена при прохождении нагретого газа заданного химического состава через слой кускового металлолома в загрузочной корзине. Построены графические зависимости изменения температур греющего газа и металлической шихты от времени и высоты загрузочной корзины. Показано, что учет изменения порозности более существенно меняет характер прогрева металлического лома по высоте корзины, чем другие теплофизические параметры в исследуемой модели. Приведены аналитические выражения, удобные для практического расчета прогрева металлического лома и температуры греющего газа на выходе из корзины как функций времени, начальных температур и массового расхода греющего газа.

**Ключевые слова:** электросталеплавильное производство, теплообмен в слое, порозность засыпки, предварительный нагрев металлической шихты.

Основным фактором снижения себестоимости электростали является замена электроэнергии более дешевыми энергоносителями, такими, как горючее топливо и кислород. Потребление электроэнергии, которое ранее было уменьшено в основном в результате применения газокислородной технологии, может быть еще снижено путем использования теплоты отходящих газов. В этой области разработан ряд новых технологий, прошедших несколько этапов развития [1].

Учитывая важность энергетического фактора и современные ограничения по выделению вредных веществ, в электросталеплавильном производстве весьма актуальна задача совершенствования тепловой работы и конструкции агрегатов предварительного подогрева металлолома. Мировой опыт показывает, что одновременное соблюдение на практике основных критериев: эффективного подогрева лома (в том числе до высокой температуры — более 800 °С), экологичности процесса и экономической эффективности является сложной научной и инженерной задачей [2–5].

Главный недостаток процесса подогрева лома — образование вредных летучих веществ. Но подогревая лом до 200–300 °С, можно практически полностью исключить процесс возгона органических примесей [6, 7]. Даже такой низкотемпературный подогрев позволяет просушить металлолом и снизить расход электроэнергии на 40–50 кВт·ч/т.

В данной статье рассматривается математическая модель подогрева лома низкотемпературным теплоносителем (450–600 °С) — выхлопными газами газотурбинной установки ГТУ, выступающей в роли индивидуального энергоисточника процесса выплавки стали в

дуговой сталеплавильной печи (ДСП), что актуально с точки зрения как энергосбережения, так и экологии [6, 7]. Часть  $k$  выхлопных газов ГТУ подается в систему подогрева шихты (СПШ), представляющую собой бадью или шахту с засыпанным металлоломом, остаток  $(1 - k)$  газов поступает непосредственно в котел-утилизатор КУ. Охлажденный рабочий газ после СПШ также поступает в КУ, где обеспечивается дополнительное дожигание топлива требуемого количества  $B_2$  для поддержания высокой температуры (1250–1400 °С) с целью деструкции диоксидов, образующихся при подогреве лома. Принципиальная схема данной системы представлена на рис. 1. Правильный подбор конструкции КУ может обеспечить выполнение основных предъявляемых требований эффективного дожигания загрязненного потока газов после подогрева металлического лома.

Рассмотрим процесс теплообмена при нагреве засыпки кускового лома в загрузочной

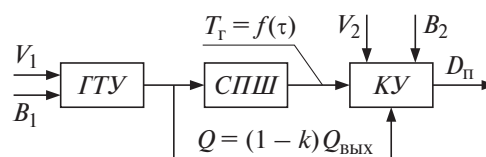


Рис. 1. Принципиальная схема системы подогрева металлического лома выхлопными газами ГТУ с последующей утилизацией в КУ с дожиганием:

$B_1$  и  $V_1$ ,  $B_2$  и  $V_2$  — подача топлива и требуемого количества воздуха в камеру сгорания ГТУ и в котел-утилизатор;  $Q$  — теплота, вносимая в котел выхлопными газами ГТУ;  $Q_{\text{вых}}$  — теплосодержание выхлопных газов ГТУ;  $k$  — доля отбора выхлопных газов на подогрев лома;  $D_{\text{п}}$  — паропроизводительность (теплопроизводительность) котла;  $T_r$  — температура рабочего газа за слоем металлолома как функция времени  $\tau$

корзине цилиндрического сечения выхлопными газами турбины (газы подаются в корзину снизу). Скорость газов  $w_\Gamma$  на входе в корзину однозначно определяется заданным массовым расходом  $G$ . Принимается, что порозность металлошихты в корзине  $\varepsilon = \varepsilon(z)$ , где  $z$  — координата слоя по высоте корзины. Газ нагревает металл, просачиваясь через поровое пространство засыпки. Примем допущение, что тепловой поток от газа к любой поверхности слоя пропорционален разности температур между газом и поверхностью металлошихты, т. е. определяется законом Ньютона — Рихмана, а коэффициент теплоотдачи от газа к кускам лома одинаков не только для всех точек поверхности куска, но и по всей высоте и сечению слоя засыпки. Через верхнее сечение корзины газ выводится из рабочего пространства.

Математическую формулировку задачи нагрева металлошихты в загрузочной корзине можно представить в следующем виде [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} -c_\Gamma \rho_\Gamma \varepsilon \frac{\partial T_\Gamma}{\partial \tau} - c_\Gamma \rho_\Gamma w_\Gamma \frac{\partial T_\Gamma}{\partial z_d} &= k_v (T_\Gamma - T_M); \\ c_M \rho_M (1-\varepsilon) \frac{\partial T_M}{\partial \tau} &= k_v (T_\Gamma - T_M) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$T_M|_{\tau=0} = \Theta_M, \quad T_\Gamma|_{\tau=0} = \Theta_M, \quad T_\Gamma|_{z=0} = \Theta_0, \quad (2)$$

где  $c_\Gamma$  и  $\rho_\Gamma$ ,  $c_M$  и  $\rho_M$  — массовые изобарные теплоемкости, Дж/(кг·К), и плотности, кг/м<sup>3</sup>, рабочего газа и металла;  $T_\Gamma$  и  $T_M$  — абсолютные температуры газа и металла, К;  $\Theta_M$ ,  $\Theta_0$  — начальные температуры металлической засыпки и греющего газа, К;  $\tau$  — время, с;  $k_v$  — объемный коэффициент теплопередачи.

Давление на выхлопе большинства газовых турбин составляет 105 – 106 кПа. Падение давления в слое насыпного металлолома не превышает 15 % первоначального [10].

При аналитическом решении математической задачи считаем, что теплофизические параметры газа и металлошихты не зависят от температуры и давления газа и принимаются по начальной температуре. Порозность слоя засыпки является постоянной и равной среднему значению. Стенки загрузочной корзины считаются непроницаемыми для газов и идеально теплоизолированными.

Посредством преобразований Лапласа — Карсона решение системы уравнений (1) при краевых условиях (2) заключается в описании безразмерной температуры газа и металлического лома в загрузочной корзине следующими функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_\Gamma(z, t) &= \tilde{\Theta} + (1 - \tilde{\Theta}) \exp\left(-\frac{z}{A}\right) \Phi\left(t - \frac{z\varepsilon}{A}\right) \times \\ &\times \frac{d}{dt} \int_0^{t - \frac{z\varepsilon}{A}} \left(1 + \frac{t - \tau - \frac{z\varepsilon}{A}}{(1-\varepsilon)B}\right) \exp\left(-\frac{\tau}{(1-\varepsilon)B}\right) \times \\ &\times I_0\left(2\sqrt{\frac{z\tau}{(1-\varepsilon)AB}}\right) d\tau, \quad 0 \leq z \leq 1, t > 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}_M(z, t) &= \exp\left(-\frac{t}{(1-\varepsilon)B}\right) \left[ \tilde{\Theta} + \frac{1}{(1-\varepsilon)B} \times \right. \\ &\times \left. \int_0^t \exp\left(\frac{\tau}{(1-\varepsilon)B}\right) \tilde{T}_\Gamma(z, \tau) d\tau \right], \quad 0 \leq z \leq 1, t > 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Phi(x)$  — функция Хевисайда;  $I_0(x)$  — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;  $t$  — обезразмеренное время.

Для построения графических зависимостей необходимо задать численные параметры задачи. При постановке задачи была принята независимость теплофизических параметров от давления (для газов) и от температуры (для газов и металла). Таким образом, принимаются следующие значения параметров:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_M &= 288 \text{ К}, \quad \Theta_0 = 790 \text{ К}, \quad \rho_\Gamma = 0,4192 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_M &= 7850 \text{ кг/м}^3, \quad \text{высота слоя } H = 5,7 \text{ м}, \\ \varepsilon &= 0,82, \quad c_M = 463 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_\Gamma &= 1057 \text{ Дж/(кг·К)}, \quad \text{радиус } R = 2,5 \text{ м}, \\ G &= 35 \text{ кг/с}, \quad w_\Gamma = G/(\pi R^2 \rho_\Gamma \varepsilon), \text{ м/с}, \\ \text{диаметр } d &= 0,4 \text{ м}, \quad \text{теплопроводность} \\ \text{газа } \lambda_\Gamma &= 0,05 \text{ Вт/(м·К)}, \quad \text{металла} \\ \lambda_M &= 55,85 \text{ Вт/(м·К)}, \quad \text{динамическая} \\ \text{вязкость газа } \mu_\Gamma &= 344 \cdot 10^{-7} \text{ Па·с}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

С учетом принятых числовых данных параметры обезразмеренной задачи составят:  $A = 1,639$ ;  $B = 8203$ ;  $\tilde{\Theta} = 0,365$ .

Исследование характера теплообмена между слоем кускового металла и греющим газом известных состава и температуры также может быть выполнено численным решением системы уравнений (1) с заданием переменного характера порозности засыпки в зависимости от высоты слоя и основных теплофизических параметров в зависимости от температуры. Решение возможно с помощью сеточных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} T_{M_{i-1,j}} &= C_{i-1,j-1} + D_{i-1,j-1} T_{M_{i-1,j-1}}; \\ T_{\Gamma_{i,j-1}} &= E_{i-1,j-1} + F_{i-1,j-1} T_{\Gamma_{i-1,j-1}} - \\ &- L_{i-1,j-1} T_{\Gamma_{i-1,j}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

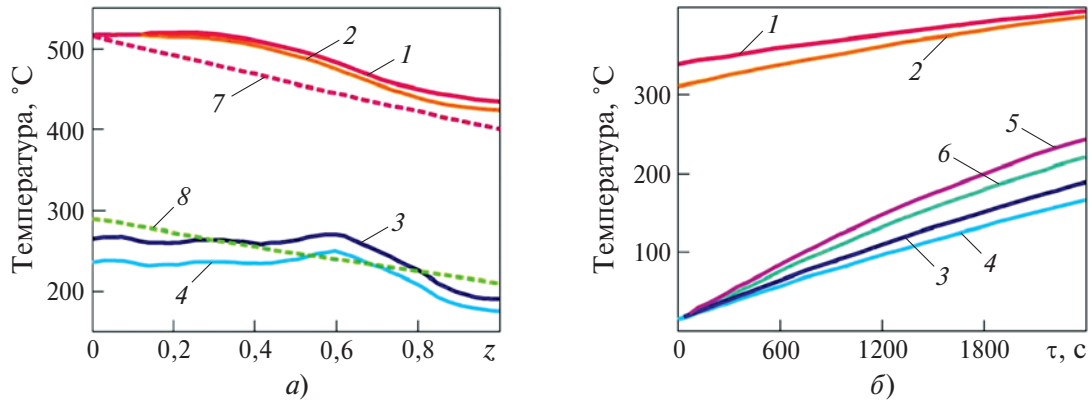


Рис. 2. Графики изменения температур греющего теплоносителя и нагреваемого металлолома: *а* — по высоте засыпки в фиксированный момент времени (40 мин); *б* — во времени для верхнего слоя засыпки:

1 — изменение температуры выхлопных газов турбины; 2 — то же для греющего воздуха; 3 — изменение температуры металлолома при продувании засыпки выхлопными газами турбины; 4 — то же для случая продувания слоя горячим воздухом; 5 и 6 — среднемассовый нагрев засыпки при продувании выхлопными газами турбины и горячим воздухом соответственно; 7 — изменение температуры выхлопных газов ГТУ при постоянной порозности (аналитический расчет); 8 — среднемассовый нагрев засыпки при продувании выхлопными газами ГТУ при постоянной порозности (аналитический расчет)

где коэффициенты сеточных уравнений  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  и  $L$  непосредственно вытекают из математической задачи (1) после замены соответствующих производных через конечную разность и несложных преобразований. Для краткости записи явный вид данных коэффициентов здесь не приводится.

Актуальность задания порозности засыпки как функциональной зависимости от высоты слоя при расчете процессов теплообмена наглядно видна при анализе графиков на рис. 2. Кривые 1–4 построены при задании закона изменения порозности по высоте засыпки через функцию, описывающую характер изменения порозности засыпки кускового лома в завалочной корзине дуговой печи по данным металлургического комбината ОАО “Уральская сталь” (Новотроицк) [11]:

$$f(z) = 0,1244 + 8,6194z - 31,6019z^2 + 40,484z^3 - 16,8516z^4. \quad (7)$$

На рис. 2, *а* кривые 7 и 8 отображают характер изменения температуры греющего газа и металлошихты по высоте засыпки (безразмерной координаты  $z$ ). Эти кривые были получены аналитическим решением уравнений (1) при постоянных параметрах (5). Сравнение кривых 1 и 7, 3 и 8 на рис. 2, *а* свидетельствует о значительном влиянии порозности на характер изменения температур металлической засыпки и греющего газа по высоте слоя в фиксированный момент времени. Однако характер изменения среднемассовой температуры засыпки во времени в обоих случаях практически идентичен (см. рис. 2, *б*), разность составляет около 3 °С. Сравнение кривых 1 и 2, 3 и 4 на рис. 2, *б* указывает также на несколько больший прогрев металлошихты при продувании слоя выхлопными газами ГТУ по сравнению с ис-

пользованием воздуха в качестве греющего теплоносителя при прежних параметрах.

Дальнейшее уточнение температур металлической засыпки и греющего газа по высоте слоя и во времени возможно путем решения численных уравнений (6) с учетом переменного характера прочих параметров ( $\mu$ ,  $\rho$ ,  $c$ ) греющего газа и металла в зависимости от температуры. Наибольший интерес представляет изменение во времени температуры греющего газа  $T_r(\tau, z)|_{z=1}$  на выходе и среднемассовой (среднеинтегральной) температуры засыпки, поскольку эти показатели являются определяющими при оценке эффективности использования греющего газа для нагрева металлолома и возможности его дальнейшей тепловой утилизации.

Для практического применения результаты численного расчета данных могут быть аппроксимированы следующими функциональными зависимостями:

для температуры газа на выходе за слоем металлолома, °С

$$T_r(\tau) = 0,7398\Theta_0 + 8,1027 \cdot 10^{-5}\Theta_0 \frac{G\tau}{\pi R^2 \rho_r H} - 1,0394 \cdot 10^{-8}\Theta_0 \left( \frac{G\tau}{\pi R^2 \rho_r H} \right)^2 - 273,15; \quad (8)$$

для среднемассовой температуры металлолома, °С

$$T_m(\tau) = 0,3638\Theta_0 + 2,1423 \cdot 10^{-4}\Theta_0 \frac{G\tau}{\pi R^2 \rho_r H} - 2,8556 \cdot 10^{-8}\Theta_0 \left( \frac{G\tau}{\pi R^2 \rho_r H} \right)^2 - 273,15. \quad (9)$$

В расчетах выше не был учтен нагрев загрузочной корзины в потоке газа. Оценка может быть осуществлена путем внесения поправки в характер изменения порозности засыпки металлолома. Если представить стенки корзины как куски металлолома в виде пластин высотой  $\Delta z$  и толщиной  $\delta$ , расположенных вплотную по внутреннему радиусу  $R$ , то в данном случае функция изменения порозности будет иметь вид

$$\tilde{\varepsilon}(\tau) = \varepsilon(\tau) \left( \frac{R}{R+\delta} \right)^2.$$

Учет нагрева корзины приводит к понижению температуры рабочего газа на выходе за слоем металлолома. Сравнение кривой изменения этой температуры с учетом поправки  $\tilde{\varepsilon}(\tau)$  при толщине стенки корзины  $\delta = 0,05$  м с ранее полученными результатами показано на рис. 3. Разница в температурах составляет 12 – 15 °С. Кривая 1 соответствует случаю “холодной” корзины (температура равна температуре металлолома), кривая 2 — случаю пренебрежения затратами энергии на нагрев корзины. При цикличности производственного процесса ДСП происходит неполное охлаждение корзины при ее движении от СПШ до печи с ломом и обратно, следовательно, второй и последующие процессы нагрева холодного лома осуществляются в “горячей” корзине (примерно 150 °С). Таким образом, кривая 1 является нижней границей изменения температуры газа за ломом, кривая 2 — верхней границей. В реальном процессе нагрева металлолома температура газа на выходе будет находиться между кривыми 1 и 2.

В рамках выполненной работы отметим следующие ключевые моменты:

получены в явном виде аналитические зависимости изменения температур металлолома  $T_M(\tau, z)$  и греющего газа (выхлопных газов ГТУ)  $T_G(\tau, z)$  при постоянных теплофизических параметрах;

выполнен численный расчет температурных полей металлошихты  $T_M$  и греющего газа  $T_G$  с учетом изменения порозности в зависимости от высоты засыпки;

показано, что учет изменения порозности ухудшает условия теплообмена в загрузочной корзине;

в рамках модели получены аппроксимирующие зависимости изменения температур греющего газа  $T_G(\tau)$  и металлолома  $T_M(\tau)$  с учетом расхода и плотности газа за газовой турбиной (перед корзиной);

определены границы изменения температуры газа на выходе за слоем с учетом тепловых потерь на нагрев стенок загрузочной корзины.

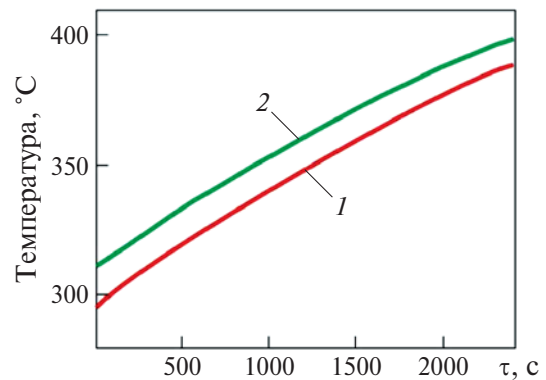


Рис. 3. Графики изменения температуры греющего газа на выходе за слоем металлошихты при учете (кривая 1) и без учета (кривая 2) нагрева корзины

### Список литературы

1. **Металлургические** мини-заводы: Монография / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, Л. В. Дорохова, А. Ю. Цупрун. — Донецк: Норд-Пресс, 2005.
2. Klein K.-H., Paul G., Koster V. The application of progressive energysaving measures at Badische Stahlwerke AG (BSW). — MPT-Metallurgical Plant and Technology, 1986.
3. **Рациональные** способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев, А. М. Шумаков. — Вестник Южно-Уральского гос. ун-та, 2008, № 9.
4. **Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Мальков Н. В.** Электрометаллургия стали и ферросплавов: Учеб. для вузов. — М.: Metallurgia, 1995.
5. “Ultimate” — новое решение в области электросталеплавильного производства / У. Вильхейм, М. Хайн, В. Райле и др. — Электрометаллургия, 2010, № 1.
6. **Бушуев А. Н., Шабловская Е. Б.** Энергетическая оценка дожигания вредных выбросов, образуемых при предварительном подогреве загрязненного металлургического лома газами умеренной температуры в электросталеплавильном производстве. — Вестник Казанского технологич. ун-та, 2013, № 15.
7. **Райле В. Т., Рошин В. Е.** Нейтрализация вредных выбросов из сталеплавильных электропечей путем термической и химической обработки отходящих газов. — Вестник ЮУрГУ, 2009, № 14.
8. **Тепло- и массообмен** в плотном слое / Б. И. Китаев, В. Н. Тимофеев, Б. А. Боковиков и др. — М.: Metallurgia, 1972.
9. **Лисиенко В. Г., Лобанов В. И., Китаев Б. И.** Теплофизика металлургических процессов: Учеб. для вузов. — М.: Metallurgia, 1982.
10. **Bohl W.** Nechnische Stromungslehre. — Vogel Fachbuch — Kamparth-Reihe, Wurzburg, 11, durchgesehene Auflage, 1998.
11. **Бушуев А. Н., Гюнтер Д. А.** Зависимость изменения порозности металлошихты по высоте загрузочной бадьи в электросталеплавильном производстве. — Вестник МГТУ им. Г. И. Носова, 2013, № 4.