

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛОДЦЕВ

С.И. Гинкул, А.Н. Лебедев, Н.В. Прокофьева (ДонНТУ, г. Донецк)

На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности определялось трехмерное температурное поле слитка в зависимости от заданных условий однозначности. Исследовался нагрев слитков холодного и горячего посада при различном часовом расходе топлива, при постоянном времени перекидки клапанов, а также при постоянном расходе топлива, но при различном времени перекидки клапанов

Народное хозяйство Украины потребляет значительное количество энергии. Отсутствие значительных промышленных топливно-энергетических ресурсов в пределах страны приводит к необходимости покупать их по мировым ценам за рубежом. В современных условиях значительное внимание должно уделяться экономии топливно-энергетических ресурсов.

Металлургическая промышленность является энергоемкой отраслью, где технологические процессы осуществляются при высоких температурах. Значительная часть выплавленной на металлургических заводах стали разливается в изложницы. Полученные слитки перед дальнейшей обработкой поступают в нагревательные колодцы.

В связи с этим при нагреве металла под обработку давлением возрастает роль регенеративных нагревательных колодцев, которые отапливаются низкокалорийным доменным газом или смесью доменного газа с небольшим добавлением коксового и природного газа.

Количество тепла, вносимого в камеру нагревательного колодца за время Δt

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

$$Q = (Q_H^P \cdot B + Q_\Phi^B + Q_\Phi^T) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где Q_H^P - теплота сгорания топлива, Дж/м³;

B - расход топлива, м³/ч;

Q_Φ^B, Q_Φ^T - физическое тепло, вносимое в колодец за счет подогрева воздуха и топлива, Дж/м³;

$$Q_\Phi^B = B \cdot L_0 \cdot c_B \cdot t_B \cdot n_B; \quad (3)$$

$$Q_{\phi}^T = B \cdot c_T \cdot t_T, \quad (4)$$

где L_0 – теоретически необходимое количество кислородоносителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 c_B, c_T – теплоемкость воздуха и топлива, $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$;
 t_B, t_T – температура подогрева воздуха и топлива, $^{\circ}\text{C}$;
 n_B – коэффициент расхода кислородоносителя.
 Количество тепла, усвоенное металлом за время $\Delta\tau$:

$$Q_1 = M_{\text{сл}} \cdot m \cdot \frac{\sum_{i,j,k} \left[c \left(t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} \right) \cdot t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} - c \left(t_{i,j,k}^{\tau} \right) \cdot t_{i,j,k}^{\tau} \right]}{N}, \quad (5)$$

где $M_{\text{сл}}$ – масса слитка, кг;
 m – число слитков в колодце;
 N – число узлов;
 $c \left(t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} \right), c \left(t_{i,j,k}^{\tau} \right)$ – теплоемкость металла в точке i,j,k в момент времени $\tau + \Delta\tau$ и τ , $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$.
 Q_2 – количество тепла, уносимое дымовыми газами за время $\Delta\tau$.

$$Q_2 = B \cdot V_{\phi} \cdot c_{\phi} \cdot t_{\phi}, \quad (6)$$

где V_{ϕ} – выход продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 c_{ϕ} – теплоемкость продуктов сгорания, $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$;
 t_{ϕ} – температура продуктов сгорания, $^{\circ}\text{C}$.
 Потери тепла через кладку за время $\Delta\tau$.

$$Q_3 = \frac{t_{\phi} - t_{oc}}{\frac{1}{\alpha_{\phi}} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_B}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot \Delta\tau, \quad (7)$$

где t_{oc} – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;
 α_{ϕ} – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к кладке, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;
 S_1, S_2 – толщина огнеупорного и теплоизоляционного слоев стенки колодца, м;
 λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности огнеупорного и теплоизоляционного слоев стенки колодца, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$;
 α_B – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки к окружающей среде, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;
 $F_{\text{кл}}$ – поверхность кладки, м^2 .
 Тогда расход топлива [1]:

$$B = \frac{k_1 \cdot (Q_1 + Q_2)}{\Delta\tau [Q_H^p + \alpha_B \cdot L_0 \cdot c_B \cdot t_B + c_B \cdot t_B - V_\delta \cdot c_\delta \cdot t_\delta]} \quad (8)$$

Общий расход топлива, м³

$$B_{\text{общ}} = \sum_{\tau=0}^{\tau=\text{конв}} B \cdot \Delta\tau. \quad (9)$$

Для определения температурного поля слитка решалось дифференциальное уравнение теплопроводности [2]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \rho L_{кр} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau}. \quad (10)$$

За начальные условия принимаем распределение температуры по объему слитка в момент посадки, т.е. при $\tau=0$ $t(x,y,z)=f(x,y,z)$. Граничные условия выбирались следующим образом. В первом периоде, когда температура печи меньше максимально допустимой, нагрев осуществляется при максимальном расходе топлива $B=\text{const}$. После того, как температура печи выходит на максимально допустимую, определяется тепловой поток между печью и поверхностью слитка. По найденному тепловому потоку определяется текущий расход топлива.

При моделировании режимов нагрева слитков предполагалось, что температура подогрева воздуха и газа по ходу нагрева остается постоянной. Работа регенеративных колодцев является циклической и связана с изменением направления подачи топлива и воздуха в камеру [3]. По каналам, через которые подавалось топливо и воздух, после перекидки клапанов удаляются продукты сгорания. Топливо, которое до этого времени заполняло канал, выбрасывается в атмосферу, что приводит к увеличению расхода топлива. Выброс топлива в атмосферу приводит к его потере и к увеличению парникового эффекта. Увеличение времени между перекидкой клапанов приводит к меньшему количеству перекидок и к меньшему количеству топлива, выбрасываемого в атмосферу.

На рис.1 приведена динамика нагрева слитков при различном расходе доменного газа.

Из рис. 1 видно, что меньший расход топлива приводит к более медленному подъему температуры печи и медленной скорости нагрева слитков. Результаты моделирование нагрева слитка приведены в таблице 1.

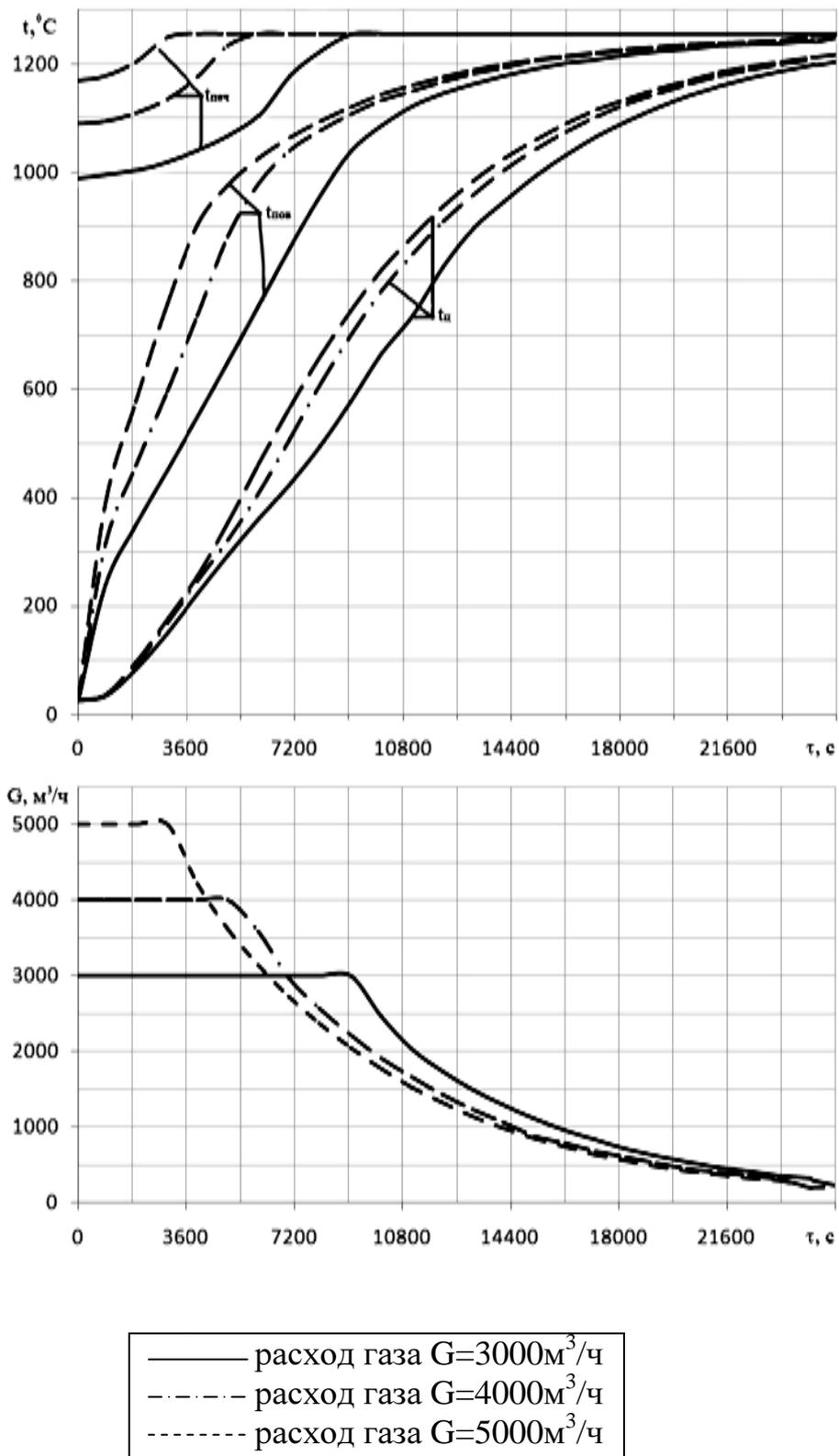


Рисунок 1 – Динамика нагрева слитков при различном расходе топлива

Так при расходе топлива $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ температура печи достигает максимального значения $t_{\text{печ}} = 1256 \text{ }^\circ\text{C}$ только через время $\tau=9000 \text{ с}$. При расходе топлива $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ в момент достижения максимальной температуры печи перепад температуры по сечению составляет $\Delta t=550^\circ\text{C}$, при расходе топлива $G=4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ перепад температуры равняется $\Delta t=500^\circ\text{C}$ и при $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ - $\Delta t=420 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 1 – Результаты моделирования нагрева слитков

Время перекидки, с	Расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$	Количество топлива, м^3			Время нагрева, ч - мин (с)	Число перекидок	Количество требуемого топлива, м^3
		Первый период	Второй период	Сумма			
900	3000	7085	4115	11200	7-00 (25200)	48	82
900	4000	5594	6166	11760	6-45 (24360)	46	78
900	5000	4224	7856	11880	6-30 (23340)	44	75
780	4000	5650	6090	11740	6-12 (24180)	52	89
Горячий. посад, 900	3000	200	1575	1775	2-32 (9060)	16	27

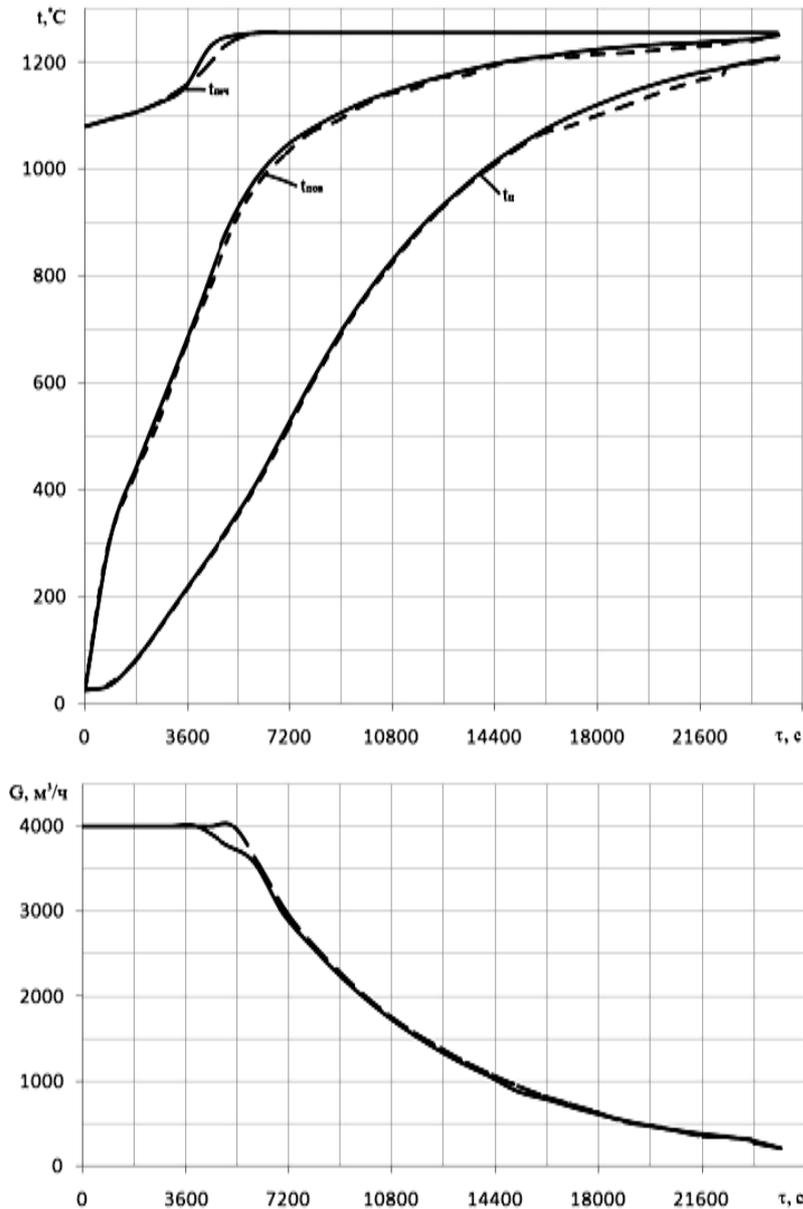
Исследовались режимы нагрева слитков при различном времени между перекидками. Для всех вариантов принималось, что отсутствие подачи топлива в ячейку равнялось $\tau=120 \text{ с}$.

При времени перекидки клапанов, равном $\tau=900 \text{ с}$ и различном расходе топлива большее время нагрева при часовом расходе топлива $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и равняется $\tau_{\text{нагр}} = 7 \text{ час}$, а при расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ время нагрева составляет $\tau_{\text{нагр}} = 6 \text{ ч } 30 \text{ мин}$.

Однако общий расход топлива при часовом расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ получится больше, чем при часовом расходе $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Это вызвано тем, что при расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ происходит интенсивный нагрев металла в первом периоде, т.е. при постоянном расходе топлива. Так в первом периоде при расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ было израсходовано на нагрев 4224 м^3 топлива, а при расходе $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ - 7085 м^3 . Но, во втором периоде, когда происходит выравнивание температур в теле и нагрев осуществляется при постоянной температуре печи $t_{\text{печ}}^{\text{max}}$ и уменьшающемся расходе топлива, ко-

личество затраченного топлива на нагрев при начальном расходе топлива $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ составило 7856 м^3 , а при $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ - 4115 м^3 .

При расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ нагрев слитка осуществляется более интенсивно, чем при $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Количество перекидок $n=44$ и количество потребляемого топлива $V=75 \text{ м}^3$ при часовом расходе $G=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, меньше, чем при расходе $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Более интенсивный нагрев металла особенно в первом периоде приводит к уменьшению суммарного времени нагрева и уменьшению числа перекидок клапанов.



Перекидка клапанов через _____ 900 с; - - - - - 780 с

Рисунок 2 – Длительность нагрева слитков при различной длительности перекидки клапанов

На рис.2 приведены результаты моделирования нагрева слитков при различной длительности между перекидками клапанов и одинаковом часовом расходе топлива $G=4000 \text{ м}^3/\text{ч}$. При более частой перекидке клапанов происходит снижение интенсивности нагрева слитков.

Выполнено моделирование нагрева слитков горячего посада с температурой поверхности $t_{\text{п}}=930 \text{ }^\circ\text{C}$ при часовом расходе топлива $G=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и временем между перекидками 900 с. Длительность нагрева составила $\tau_{\text{нагр}} = 2 \text{ ч } 32 \text{ мин}$, суммарное количество топлива на нагрев $V= 1775 \text{ м}^3$ число перекидок клапанов $n=16$, количество теряемого топлива за нагрев $V= 27 \text{ м}^3$.

Как видно из таблицы, уменьшение длительности цикла с $\tau=900 \text{ с}$ до $\tau=780 \text{ с}$ привело к тому, что при расходе топлива $G=4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ количество топлива на нагрев практически одно и то же $V= 11740 \text{ м}^3$. При более частом переключении нагрев слитков получается более равномерным. Это способствует быстрейшему нагреву. Увеличение числа переключений приводит к тому, что больше топлива теряется в атмосферу.

Таким образом, в результате моделирования тепловой работы регенеративных нагревательных колодцев было исследовано, как влияют на длительность нагрева различные факторы. Показано, что увеличение расхода топлива приводит к сокращению времени нагрева, а с другой стороны увеличивается количество затраченного топлива на нагрев. Поскольку при большем часовом расходе топлива уменьшается число перекидок, то уменьшаются и потери топлива в атмосферу.

Применение горячего посада приводит к уменьшению затраченного топлива на нагрев и сокращению времени нагрева.

Литература

1. Казанцев Е.И., Котляревский Е.М., Баженов А.В., Заварова И.С. Энергосберегающая технология нагрева слитков - М: Metallurgy, 1992, 176 с.
2. Гинкул С.И., Казанцев Е.И., Касютин С.С. – Metallurgical and Mining Industry, 1997, №4. – С. 79-82.
3. Гинкул С.И., Прокофьева Н.В. Особенности нагрева слитка в регенеративных нагревательных колодцах / Материалы III Международной научно-практической конференции «Дни науки -2007». – Том 11. Технические науки. Строительство и архитектура – Днепропетровск: «Наука и образование», 2007. – С. 7-11.

© Гинкул С.И., Лебедев А.Н., Прокофьева Н.В. 2007