

УДК 669.162.23

Койфман А.А.¹, Симкин А.И.², Томаш А.А.³

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Рассмотрен тепловой баланс регенеративного теплообменника, работающего под давлением в режиме нагрева насадки дымовыми газами. Анализ скорости нагрева насадки был произведен с использованием решения задачи Т. Шумана. Расхождение теплового баланса нагрева насадки при различных значениях избыточного давления продуктов горения не превышает 1,04 %.

Регенераторы с кирпичной насадкой получили широкое распространение в черной металлургии и используются в мартеновском, доменном и коксовом производствах. Во время нагрева насадки регенераторов давление газа в них близко к атмосферному [1, 2].

Для интенсификации процесса теплообмена было предложено повысить давление газа – теплоносителя [3]. Это особенно актуально для доменных воздухонагревателей, которые конструктивно приспособлены для работы в условиях повышенного давления. В режиме дутья воздух, проходящий через насадку, находится под давлением до 3 ати.

Анализ теплообмена между продуктами горения и насадкой на основе решения задачи Шумана [3] показал, что с повышением давления теплоносителя время нагрева насадки сокращается с 9 часов 20 мин при атмосферном давлении до 4 часов 30 мин при избыточном давлении 1 атм. Сокращение времени происходит за счет увеличения количества горячих газов, которые может пропустить насадка в единицу времени и, соответственно, увеличения количества вносимого тепла. Однако изменение давления приводит к изменению распределения температур по высоте регенератора и влияет на коэффициент использования тепла (далее КИТ) в теплообменнике.

Цель работы – анализ изменения эффективности усвоения тепла насадкой регенератора при повышении давления газа-теплоносителя.

На рис. 1 представлено распределение температур по высоте насадки после завершения нагрева. Моментом окончания нагрева считалось достижение нижним горизонтом насадки (30 м) температуры 300 °С.

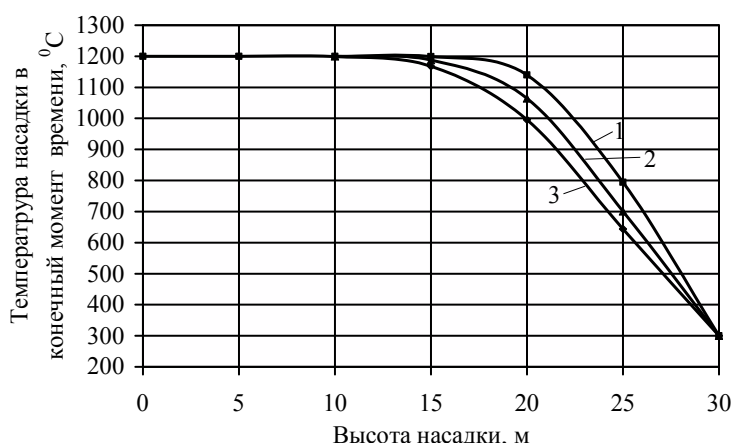


Рис. 1 – Распределение температур по высоте насадки в конце периода нагрева при избыточном давлении в регенераторе: 1 – 0 кПа; 2 – 50 кПа; 3 – 100 кПа.

¹ПГТУ, аспирант

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

³ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

Для дальнейшего расчета каждый из графиков (рис. 1) был заменен комбинацией прямой линии $t_1(h)$ (участок 1, 0 – 10 м) и кривой 4-го порядка $t_2(h)$ (участок 2, 10 – 30 м), где h – расстояние от верхней поверхности насадки. Так, например, для давления 50кПа $t_1(h) = 1200$ °С,

$$t_2(h) = 0,02 \cdot h^4 - 1,71 \cdot h^3 + 44,40 \cdot h^2 - 479,69 \cdot h + 3044,86. \quad (1)$$

Аналогично получены уравнения для других распределений температур насадки при различных значениях избыточного давления. При этом значение корреляционного отношения для всех случаев было близким к 1.

Количество тепла, переданное насадке за время нагрева, составляет

$$Q_{нас} = S_{сеч} \cdot \gamma_n \cdot c_{мат} \cdot \left(t_1 \cdot h_1 + \int_{h_1}^{h_2} (0,02 \cdot h^4 - 1,71 \cdot h^3 + 44,40 \cdot h^2 - 479,69 \cdot h + 3044,86) dh \right), \quad (2)$$

где $S_{сеч}$ – площадь сечения насадки воздухонагревателя, $м^2$;

γ_n – эквивалентная насыпная плотность материала насадки, $кг/м^3$;

$c_{мат}$ – теплоемкость материала насадки, средняя по всему диапазону температур, $кДж/(кг \cdot °С)$;

h_1 – расстояние от верхнего края насадки до конца 1-го участка, $h_1 = 10$ м;

h_2 – расстояние от верхнего края насадки до конца 2-го участка, соответствующее высоте насадки, $h_2 = 30$ м;

Аналогично рассчитывается количество тепла, сохраненного насадкой, в период её нагрева при других значениях избыточного давления газа.

Количество тепла, переданное насадке продуктами горения, с увеличением избыточного давления несколько уменьшается (рис. 2, кривая 2). Снижение количества аккумулированного тепла обусловлено меньшими температурами насадки на отрезке высоты от 10 до 28 м (рис. 1).

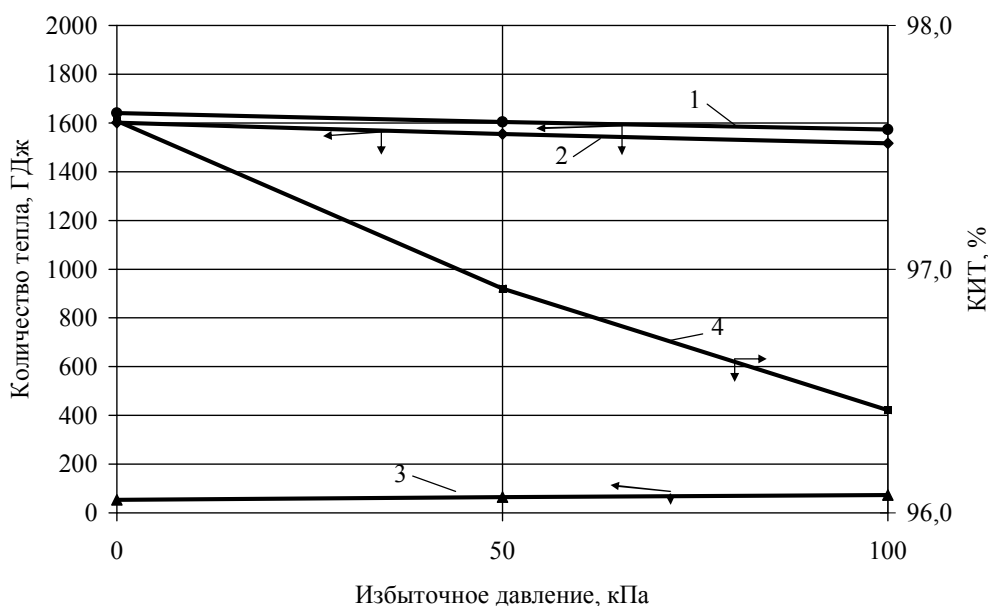


Рис. 2 – Графики зависимости от избыточного давления: 1 – количества тепла, вносимого с продуктами горения; 2 – аккумулированного насадкой; 3 – выносимого отходящими газами; 4 – значения КИТ.

Температура отходящих газов в соответствии с расчетами меняется следующим образом: сначала остается неизменной, потом возрастает (рис. 3). Смещение кривых при повышении давления обусловлено сокращением продолжительности нагрева насадки. Восходящие отрезки кривых были аппроксимированы с корреляционным отношением, близким к 1.

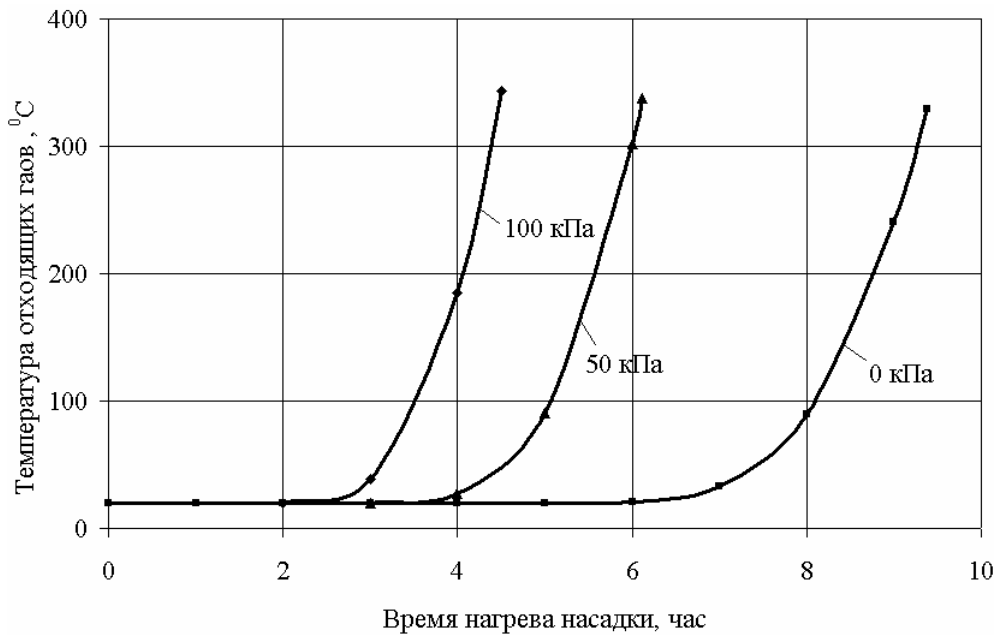


Рис. 3 – Графики изменения температуры отходящих из насадки газов в период нагрева при различных значениях избыточного давления

Аналогично выше описанному алгоритму аппроксимации полученных кривых, каждый из графиков (рис. 3) был заменен комбинацией прямой линии $t_1(\tau)$ (участок 1: 0 – 5 часов при 0 кПа; 0 – 3 часа при 50 кПа; 0 – 2 часа при 100 кПа) и кривой 4-го порядка $t_2(\tau)$ (участок 2: 5 – 9,4 часа при 0 кПа; 3 – 6,1 часа при 50 кПа; 2 – 4,5 часа для 100 кПа), где τ – время нагрева насадки. Так, например, для давления 50 кПа $t_1(\tau) = 20$ °C ,

$$t_2(\tau) = -2,32 \cdot \tau^4 + 56,93 \cdot \tau^3 - 429,68 \cdot \tau^2 + 1314,60 \cdot \tau - 1405,81. \quad (3)$$

Количество тепла, уносимого из насадки отходящими газами, составляет

$$Q_{отх} = 3600 \cdot c_2 \cdot u_0^h \cdot S_{сеч} \cdot \left(t_1 \cdot \tau_1 + \int_{\tau_1}^{\tau_2} (-2,32 \cdot \tau^4 + 56,93 \cdot \tau^3 - 429,68 \cdot \tau^2 + 1314,60 \cdot \tau - 1405,81) d\tau \right), \quad (4)$$

где c_2 – теплоемкость отходящих газов, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

u_0^h – скорость продуктов горения, приведенная к пустому сечению, $\text{м}/\text{с}$;

τ_1 – промежуток времени на участке 1, час;

τ_2 – промежуток времени на участке 2, час.

Общее количество тепла, поступающего в насадку с продуктами горения, нагретыми до 1200 °C , составит

$$Q_{пр} = 3600 \cdot c_2 \cdot u_0^h \cdot t_{пр} \cdot S_{сеч} \cdot \tau_{кон}, \quad (5)$$

где $t_{пр}$ – температура поступающего в насадку газа, $t_{пр} = 1200$ °C ;

$\tau_{кон}$ – конечное время нагрева, час.

В общем виде тепловой баланс идеального регенератора, работающего в режиме нарева насадки дымовыми газами, состоит из трех статей и не учитывает потерь тепла:

$$Q_{пр} = Q_{нас} + Q_{отх}. \quad (6)$$

Тепловой баланс процесса нагрева насадки при различных значениях избыточного давления представлен в таблице 1. Расхождение баланса не превышает 1,04 %. Невязка объясняется тем, что в расчетах использовалось постоянное значение теплоемкости материала насадки, соответствующее ее средней температуре 385 °C .

Таблица 1 – Тепловой баланс процесса нагрева насадки

Приход			Расход		
Статья	Кол-во тепла, ГДж	%	Статья	Кол-во тепла, ГДж	%
Избыточное давление 0 кПа					
1 Поступает с газом	1641	100	1 Аккумулируется насадкой	1601,83	97,61
			2 Уносится газом	53,04	3,23
Итого	1641	100	Итого	1654,87	100,84
Избыточное давление 50 кПа					
1 Поступает с газом	1603	100	1 Аккумулируется насадкой	1554,11	96,92
			2 Уносится газом	65,05	4,06
Итого	1603	100	Итого	1619,16	100,98
Избыточное давление 100 кПа					
1 Поступает с газом	1573	100	1 Аккумулируется насадкой	1516,56	96,42
			2 Уносится газом	72,68	4,62
Итого	1573	100	Итого	1589,24	101,04

КИТ можно рассчитать по одной из двух равноценных формул:

$$КИТ = \frac{Q_{np} - Q_{отх}}{Q_{np}} \cdot 100\% = \frac{Q_{нас}}{Q_{np}} \cdot 100\% . \quad (7)$$

С увеличением давления газа КИТ снижается (рис. 3). Но его снижение незначительно, с 97,6 % при атмосферном давлении, до 96,4 % при избыточном давлении 1 атм, и существенно не влияет на эффективность работы регенератора.

Выводы

1. Небаланс расчета составляет 1,04 %, что является приемлемым для технических расчетов.
2. С увеличением избыточного давления газа-теплоносителя на 1 атм КИТ в регенеративном теплообменнике снижается от 97,6 до 96,4 %. Такое снижение КИТ можно считать незначительным, оно существенно не влияет на эффективность работы регенератора.
3. Сокращение продолжительности нагрева насадки позволит увеличить температуру дутья на 30 – 80 °С в зависимости от состояния насадки и режимов подачи дутья в доменную печь.

Пречень ссылок

1. *Комолов В.Г.* Новые машины и оборудование для производства кокса / *В.Г. Комолов, Г.Н. Макаров.* – М.: Металлургия, 1987. – 144 с.
2. *Доменные воздухонагреватели / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каштанова* и др. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
3. *Койфман А.А.* Использование программы моделирования нагрева насадки для оценки работы каупера и управления подсистемой подготовки дутья АСУ ТП выплавки чугуна в доменной печи / *А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш* // Автоматизация технологических объектов та процессів. Пошук молодих: Зб. наук. пр. VII Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів. – Донецьк, 2007. – С. 218.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 15.02.2008