

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 669.162.23

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Рассмотрен доменный воздухонагреватель, работающий под давлением в режиме «нагрева» насадки дымовыми газами. Модель нагрева основывается на решении задачи о теплообмене в неподвижном слое при линейном изменении начальной температуры насадки по ее высоте, и постоянной температуре дымовых газов на входе в насадку. С увеличением давления газа-теплоносителя период нагрева насадки сокращается. Колебания коэффициента использования тепла не превышают 1 % при различных избыточных давлениях.

Повышение температуры дутья является важнейшим направлением интенсификации работы доменных печей. Известны различные способы увеличения температуры дутья: добавление в доменный газ природного, обогащение воздуха для сжигания доменного газа кислородом, предварительный подогрев воздуха, идущего на сжигание [1], повышение скорости горячего теплоносителя [2] и др.

Предложенный авторами способ нагрева насадки под давлением представляется весьма эффективным в современных условиях за счет уменьшения времени пребывания воздухонагревателя в режиме «нагрев». Ранее был рассмотрен режим «нагрева» насадки регенеративного теплообменника, работающего под давлением, при неизменной по высоте начальной температуре насадки, равной 20 °С [3]. Реализация этой работы базируется на решении задачи Т. Шумана [4]. Результаты расчета показали, что при повышении избыточного давления время нагрева насадки уменьшается при незначительном уменьшении коэффициента использования тепла (КИТ). Расхождение теплового баланса нагрева насадки не превышало 1,04 % [5]. Задача Т. Шумана является частным случаем задачи о теплообмене в неподвижном слое при следующих условиях: температура теплоносителя на входе в насадку (неподвижный слой) постоянна ($T' = 1200$ °С); начальная температура материала насадки неизменна по всей высоте и равна $t' = 20$ °С; в неподвижном слое и в газе-теплоносителе нет источников тепла. Решение этой задачи не отражает в полной мере реальную работу воздухонагревателя, имеющего в начале режима «нагрева» переменное распределение температуры по высоте насадки.

Целью настоящего исследования является дальнейший анализ работы регенеративного теплообменника (доменного воздухонагревателя), работающего под давлением в период «нагрева». При этом начальная температура насадки соответствует реальным условиям и изменяется от 1150 °С до 70–100 °С (соответственно ее верх и низ). Дополнительно исследовали влияние повышения давления на аккумуляцию тепла в насадке и время ее нагрева.

В соответствии с начальным распределением температур, приведенным выше, была поставлена задача со следующими условиями:

- температура газа на входе в насадку постоянна;
- температура насадки представляет собой функцию расстояния от верха насадки.

Математически эта задача формулируется следующим образом [6]:

$$\frac{d\theta}{dY} = \vartheta - \theta, \quad (1)$$

¹ПГТУ, ст. преп.

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

³ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

$$\frac{d\vartheta}{dZ} = \theta - \vartheta, \quad (2)$$

где θ – относительная температура газа, $\theta = \frac{T-t'}{T'-t'}$;

ϑ – относительная температура материала насадки, $\vartheta = \frac{t-t'}{T'-t'}$;

Y – безразмерная высота насадки, $Y = \frac{k_V \cdot y}{u_0 C_G}$;

Z – безразмерное время, $Z = \frac{k_V \tau}{C_{каж} \rho_{нас}}$;

T – температура газа, °C;

t – температура насадки, °C;

k_V – объемный суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективный и лучистый теплообмены между газом и насадкой и передачу тепла теплопроводностью внутри насадки, $\frac{Вт}{м^3 \cdot К}$;

y – высота насадки, расстояние по вертикали от верхней границы насадки, м;

u_0 – скорость продуктов горения, приведенная к пустому сечению, м/с;

C_G – теплоемкость газа, $\frac{Дж}{м^3 \cdot К}$;

τ – время, с;

$C_{каж}$ – кажущаяся теплоемкость материала насадки, $\frac{Дж}{м^3 \cdot К}$;

$\rho_{нас}$ – средняя насыпная плотность насадки равная отношению ее массы к полному объёму, включая цилиндрические каналы, кг/м³.

Для решения этой задачи были приняты следующие начальные условия:

$$Z = 0, \quad Y = 0, \quad \theta = 1$$

Начальное изменение температуры материала насадки относительно ее высоты $\vartheta = f(Y)$ принято линейным и представлено на рис. 1:

$$f_i = a_i + b \cdot Y \quad (3)$$

Решение задачи имеет следующий вид:

$$T = - \int_0^{Y_H} f(Y) \frac{\partial \theta(Y_H - Y)}{\partial (Y_H - Y)} dY \quad (4)$$

$$t = f(Y_H) \cdot e^{-Z} - \int_0^{Y_H} f(Y) \frac{\partial \vartheta(Y_H - Y)}{\partial (Y_H - Y)} dY, \quad (5)$$

где Y_H – высота насадки, м.

Разбив высоту насадки на n участков, получаем следующие выражения

$$T = \sum_{i=1}^n (f_i(Y_H) \cdot [\theta(Y_H - Y_i, Z) - \theta(Y_H - Y_{i-1}, Z)]), \quad (6)$$

$$t = f(Y_H) \cdot e^{-Z} + \sum_{i=1}^n (f_i(Y_H) \cdot [\vartheta(Y_H - Y_i, Z) - \vartheta(Y_H - Y_{i-1}, Z)]); \quad (7)$$

где i – номер участка насадки ($i \in [1, n]$).

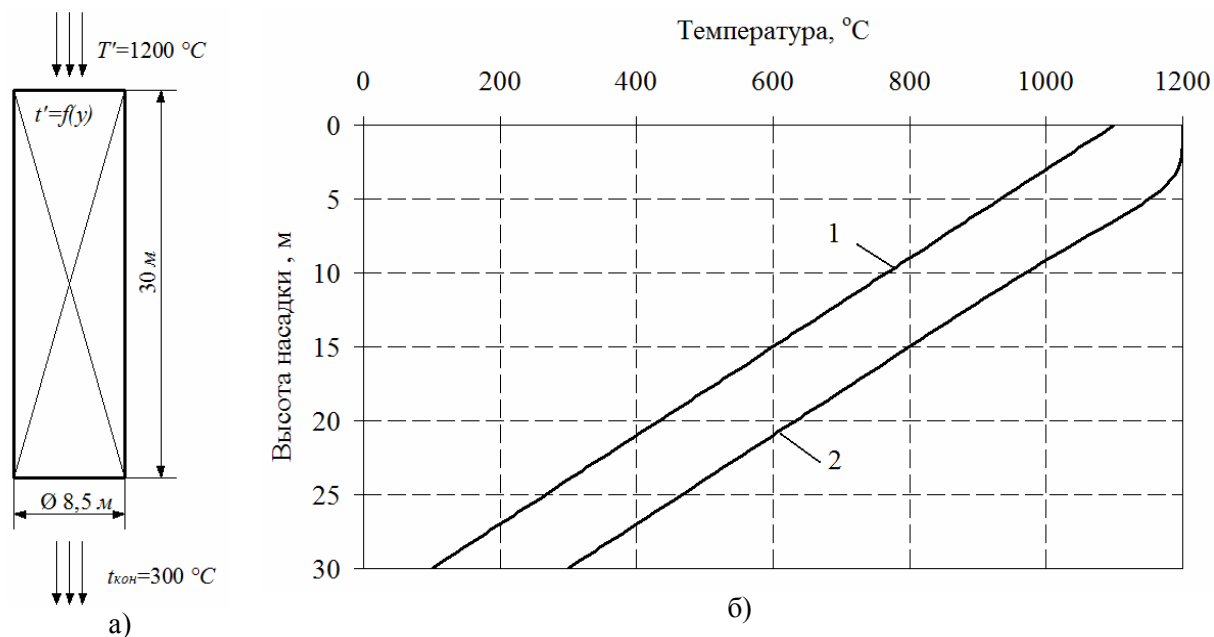


Рис. 1 – Начальные условия (а) и распределение температур по высоте насадки (б):
 1 – начальное распределение температуры в насадке;
 2 – распределение температуры в насадке в конечный момент времени

Подставив (3) в уравнения (6) и (7), получаем следующие выражения для определения температур материала и газа в насадке в любой момент времени

$$t = f(Y_H) \cdot e^{-Z} + \sum_{i=1}^n ([a_i + b \cdot Y_H] \cdot [\vartheta(Y_H - Y_i, Z) - \vartheta(Y_H - Y_{i-1}, Z)]); \quad (8)$$

$$T = \sum_{i=1}^n ([a_i + b \cdot Y_H] \cdot [\theta(Y_H - Y_i, Z) - \theta(Y_H - Y_{i-1}, Z)]). \quad (9)$$

Используя выражения (8) и (9), был реализован алгоритм расчета температур насадки и газа в любой момент времени. Время окончания нагрева насадки определялось достижением ее низом температуры в 300 °C. Достаточная точность расчета достигается при разбиении высоты насадки не менее чем на 50 участков.

При повышении избыточного давления воздухонагревателя время нагрева насадки уменьшается (рис. 2).

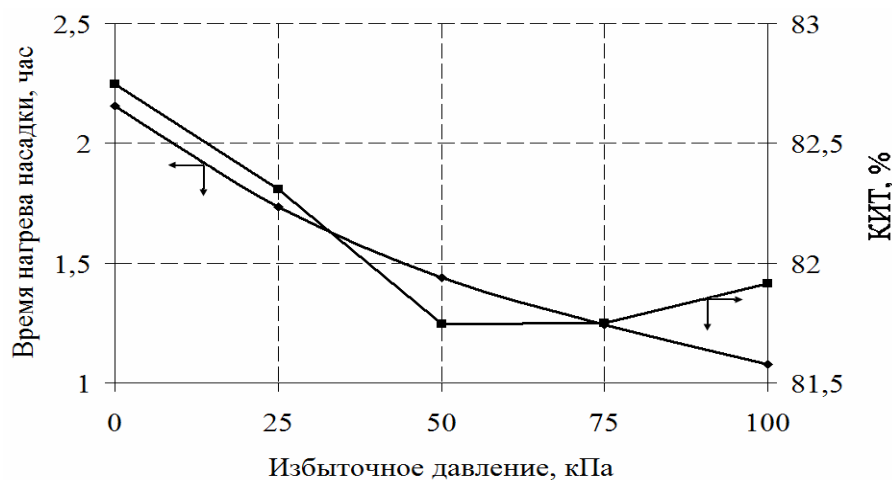


Рис. 2 – Влияние повышения давления в рабочем пространстве воздухонагревателя на продолжительность нагрева насадки и коэффициент использования тепла

При традиционном способе нагрева насадки (давлении в рабочем пространстве, близком к атмосферному), продолжительность периода нагрева составила 2,15 часа, что соответствует времени нагрева доменных воздухонагревателей. При увеличении давления газа-теплоносителя на 50 кПа период нагрева сокращается до 1,44 часа, на 100 кПа – до 1,09 часа.

Коэффициент использования тепла также снижается при повышении давления в воздухонагревателе. Но это снижение не превышает 1 % (рис. 2) и не может значительно сказаться на эффективности работы доменного воздухонагревателя. В тоже время сокращение времени нагрева насадки в 1,5 – 2 раза позволяет достигать более высоких температур дутья, сократить высоту воздухонагревателей и их количество в блоке, существенно снизив капитальные вложения.

Выводы

1. Выполнен анализ работы доменного воздухонагревателя под давлением в режиме нагрева насадки при линейном изменении начальной температуры по ее высоте с помощью разработанной программы, основанной на приближенном решении уравнений теплообмена в неподвижном слое.
2. При увеличении избыточного давления газа-теплоносителя от 0 до 100 кПа время нагрева насадки воздухонагревателя уменьшается с 2,15 ч до 1,09 ч.
3. Снижение коэффициента использования тепла при повышении давления в воздухонагревателе в режиме «нагрева» незначительно (не более 1 %) и не влияет на эффективность его работы.

Пречень ссылок

1. *Грес Л.П.* Высокоэффективный нагрев доменного дутья: Монография / *Л.П. Грес.* – Днепропетровск: Пороги, 2008, – 492 с.
2. *Грес Л.П.* Исследование влияния скорости теплоносителей на параметры теплообмена в насадке воздухонагревателя / *Л.П. Грес, А.Е. Быстров, Ю.М. Флейшман* // *Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України.* – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 116 – 121.
3. *Койфман А.А.* Возможность интенсификации процессов теплообмена между кирпичной насадкой и газами под давлением / *А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш* // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – М., 2008. – № 5. – С. 39 – 42.
4. *Телегин А.С.* Термодинамика и тепло-массообмен / *А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко.* – М.: Металлург, 1980. – 264 с.
5. *Койфман А.А.* Тепловой баланс регенеративного теплообменника, работающего под давлением / *А.А. Койфман, А.И. Симкин, А.А. Томаш* // *Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Ч. 2.* – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – С. 141 – 144.
6. Тепло- и массообмен в плотном слое / *Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др.* – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.

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

Статья поступила 13.02.2009