

Сысоева Т.Е. – ассистент, НМетАУ

Абраменков Ю.Я. – канд. техн. наук, проф., НМетАУ

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАГРЕВА (ОХЛАЖДЕНИЯ) НЕПОДВИЖНОГО ПОРИСТОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА

В работе представлена конечно-разностная постановка задачи нагрева (охлаждения) пористого слоя материала потоком газа, учитывающая изменение этого объема газа, вследствие теплообмена с материалом неподвижного слоя с учетом потерь теплоты теплопроводностью через ограничивающие стенки камеры слоя. Предложена методика расчета процесса нагрева (охлаждения) материала слоя, которая, имея особенности существующих методик, дополнительно дает информацию о продвижении конкретных объемов газа по слою. Приведены результаты расчетов по этой методике в сравнении с результатами экспериментов и расчетов по существующим методикам.

Введение

В настоящее время широкое применение получили регенеративные теплообменники, которые позволяют наиболее полно утилизировать теплоту отходящих продуктов сгорания из различных высокотемпературных установок и агрегатов. Математические модели позволяют провести анализ различных технических решений. Математическая модель регенеративного теплообменника строится на основании допущений, проведенных при моделировании процесса нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала. Поэтому в данной работе рассматривается процесс теплообмена в слое материала и показана физическая сущность постановки задачи.

При математическом моделировании теплообмена в неподвижном пористом слое материала используются различные подходы для решения этой задачи, которые учитывают: массивность элементов насадки [1 – 3], продольный перенос теплоты теплопроводностью в насадке [3]; потери теплоты через боковые стены [4 – 7]; влияние теплообмена в наднасадочном пространстве на работу насадки [6, 7]. Однако в указанных работах нахождение температурного состояния слоя и теплоносителя оторвано от процесса его движения,

хотя по приближенным решениям дифференциального уравнения теплообмена в слое можно связать поведение конкретного объема газа с процессом теплообмена [8, 9]. Этого не было сделано в численных конечно-разностных схемах решения уравнения теплообмена в слое [1, 2, 5 – 7], по-видимому, по причинам формального представления дифференциального уравнения теплообмена в слое, на что было указано в работе [10] при получении конечно-разностных уравнений теплообмена в слое методом элементарных тепловых балансов. В данной статье реализованы особенности теплообмена газа с неподвижной пористой насадкой в рамках ограничений, сделанных при выводе дифференциального уравнения нагрева (охлаждения) газом неподвижного слоя [8, 9]. Выведенные в работе [10] конечно-разностные уравнения теплового баланса для газа, движущегося в слое, и для материала слоя в конечном виде не отличаются от таких же в [1 – 7], однако система дополнена соотношением, которое связывает элементарный промежуток времени $\Delta\tau$ и элементарное приращение высоты слоя Δh (1). Выполнение соотношения (1) позволяет определить, как положение выбранного объема газа в пространстве слоя по высоте, так и распределение температуры в слое, максимально приближенное к действительному. Кроме того, уравнения для слоя дополнены уравнениями теплопередачи через огнеупорную кладку стен камеры.

Постановка задачи

Расчет процесса теплообмена в неподвижном пористом слое материала представлен в виде двух отдельных блоков: первый – теплообмен в слое, второй – теплопередача через огнеупорную кладку стен камеры.

При построении конечно-разностной методики расчета нагрева неподвижного слоя материала, приведенной ниже, было принято, что величина первого элементарного слоя насадки Δh выбирается так, чтобы она была приблизительно равна эквивалентному диаметру элемента насадки d_9 . При известной скорости теплоносителя на входе в насадку, рассчитывается величина элементарного интервала времени $\Delta\tau$, и она остается постоянной в процессе всего расчета. Текущее время процесса теплообмена определяется, как $\tau_{нагр}^k = \sum \Delta\tau_{ex.1}^{j,k}$ (k – номер шага по текущему времени процесса теплообмена; j – номер элементарного объема теплоносителя, входящего в насадку; $k = j$). Расчет заканчивается, когда текущее время процесса теплообмена будет равно заранее заданному времени нагрева слоя $\tau_{нагр}^{зад}$ ($\tau_{нагр}^k \approx \tau_{нагр}^{зад}$).

В процессе движения газа по насадке материал слоя нагревается (охлаждается), объемный расход газа уменьшается (увеличивается), высота каждого следующего элементарного слоя Δh также уменьшается (увеличивается), то есть в системе конечно-разностных уравнений [10] необходимо выдерживать соотношение:

$$\Delta h_i^{j,k} = W_{ж.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right) \cdot \Delta \tau_{вх.и}^{j,k}, \quad (1)$$

где i – номер шага по высоте насадки; $W_{ж.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right)$ – действительная скорость движения j -ого элементарного объема газа в i -ом элементарном слое в k -ый момент времени при температуре газа на входе в этот элементарный слой, м/с.

Действительная величина i -ого элементарного слоя, в этом случае, будет

$$\begin{aligned} \Delta V_{сл.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right) &= \Delta h_i^{j,k} \cdot S_{ш} = W_{ж.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right) \cdot \Delta \tau_{вх.и}^{j,k} \cdot S_{ш} = \\ &= \frac{W_{z.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right)}{\varepsilon} \cdot \Delta \tau_{вх.и}^{j,k} \cdot S_{ш} \end{aligned}, \quad (2)$$

где $S_{ш}$ – площадь поперечного сечения камеры (шахты) насадки, м²; ε – порозность слоя; $W_{z.и}^{j,k} \left(t_{z.вх.и}^k \right)$ – скорость движения газа на свободное сечение камеры j -ого элементарного объема в i -ом элементарном слое в k -ый момент времени при температуре газа на входе в этот элементарный слой, м/с.

Расчет нагрева слоя по предлагаемой методике, организован следующим образом.

Первый элементарный объем теплоносителя (газа) $\Delta V_{z.1}^{1.1} \left(t_{z.вх.1}^1 \right)$ в момент времени $\Delta \tau_{вх.1}^{1.1}$ мгновенно заполняет объем слоя материала $\Delta V_{сл.1}^{1.1} \left(t_{z.вх.1}^1 \right)$ высотой $\Delta h_1^{1.1} = W_{ж.и}^{1.1} \left(t_{z.вх.1}^1 \right) \cdot \Delta \tau_{вх.и}^{1.1} = W_{ж.вх}^{1.1} \left(t_{z.вх}^1 \right) \cdot \Delta \tau$ и, находясь там, в течение элементарного промежутка времени $\Delta \tau_{вх.1}^{1.1} = \Delta \tau$, обменивается теплотой с материалом насадки и боковыми стенками камеры. При этом температура газа в элементарном слое материала понижается (повышается) от $t_{z.вх}^1 = t_{z.вх.1}^1$ до $t_{z.1}^1 = t_{z.вх.2}^1$, а температура материала и боковых стен в этом слое увеличивается (уменьшается) от $t_{м.1}^0$ до $t_{м.1}^1$, и от $t_{кл.1}^0$ до $t_{кл.1}^1$. В конце первого элементарного промежутка времени $\Delta \tau^{1.1}$ первый объем газа мгновенно изменяет свой объем в соответствии с температурой $t_{z.1}^1 = t_{z.вх.2}^1$ и переходит

во второй элементарный объем слоя. При уже меньшем действительном своем объеме он заполняет элементарный слой материала высотой $\Delta h_2^{1.1} = W_{ж.2}^{1.1} \left(t_{з.вх.2}^1 \right) \cdot \Delta \tau_{вх.2}^{2.1} = W_{ж.вх.2}^{1.1} \left(t_{з.1}^1 \right) \cdot \Delta \tau$.

Так как в процессе расчета проводится отслеживание движения каждого элементарного объема газа через слой, то этот объем имеет свое время «жизни» в элементарном слое $\Delta \tau_i^{j.m} = \Delta \tau$ и свое текущее время $\tau_{тек.i}^{j.m}$ (m – номер шага элементарного объема газа по времени «жизни» его в насадке). При этом текущее время «жизни» первого элементарного объема газа в насадке составляет $\tau_{тек.2}^{1.2} = \Delta \tau_1^{1.1} + \Delta \tau_2^{1.2}$, а текущая координата $(h_{тек.i}^{j.k})$ $h_{тек.2}^{1.1} = \Delta h_1^{1.1} + \Delta h_2^{1.1}$. Первый объем газа $\Delta V_{з.2}^{1.1} \left(t_{з.вх.2}^1 \right)$ находится в элементарном слое $\Delta V_{сл.2}^{1.1} \left(t_{з.вх.2}^1 \right)$ в течение времени $\Delta \tau$ и также обменивается теплотой с материалом насадки и боковыми стенами кладки, температура газа во втором слое уменьшается (увеличивается) от $t_{з.вх.2}^1$ до $t_{з.2}^1 = t_{з.вх.3}^1$, температура материала насадки и кладки боковых стен увеличивается (уменьшается) от $t_{м.2}^0$ до $t_{м.2}^1$, и от $t_{кл.2}^0$ до $t_{кл.2}^1$. В конце $\Delta \tau$ уменьшенный объем газа мгновенно занимает третий элементарный слой $\Delta V_{сл.3}^{1.1} \left(t_{з.вх.3}^1 \right)$, меньший, чем второй $\Delta V_{сл.2}^{1.1} \left(t_{з.вх.2}^1 \right)$. Таким образом, первый и следующие элементарные объемы (порции) газа на каждом шаге по высоте постоянно уменьшаются.

В то время, когда первый объем газа переходит во второй элементарный слой $\Delta V_{сл.2}^{1.1} \left(t_{з.вх.2}^1 \right)$ высотой $\Delta h_2^{1.1}$, в насадку входит второй объем газа и занимает объем слоя $\Delta V_{сл.1}^{2.2} \left(t_{з.вх.1}^2 \right)$ высотой $\Delta h_1^{2.2}$. Если скорость теплоносителя на входе в первый слой $W_{з.1}^{j.k} \left(t_{з.вх.1}^k \right)$ не изменяется, то первый объем слоя не изменяется $(\Delta V_{сл.1}^{j.k} \left(t_{з.вх.1}^k \right) = const)$ для всех порций газа.

Когда первый объем газа в объеме слоя высотой $\Delta h_3^{1.1}$ в момент времени $\tau_{тек.3}^{1.3} = \Delta \tau_1^{1.1} + \Delta \tau_2^{1.2} + \Delta \tau_3^{1.3}$ будет иметь текущую координату $h_{тек.3}^{1.1} = \Delta h_1^{1.1} + \Delta h_2^{1.1} + \Delta h_3^{1.1}$, тогда второй объем газа занимает второй объем слоя $\Delta V_{сл.2}^{2.2} \left(t_{з.вх.2}^2 \right)$ высотой $\Delta h_2^{2.2}$ ($\tau_{тек.2}^{2.2} = \Delta \tau_1^{2.1} + \Delta \tau_2^{2.2}$, $h_{тек.2}^{2.2} = \Delta h_1^{2.2} + \Delta h_2^{2.2}$), причем для второй порции газа второй объем слоя $\Delta V_{сл.2}^{2.2} \left(t_{з.вх.2}^2 \right)$ будет больше, чем второй объем слоя первого объе-

ма газа $\Delta V_{сл.2}^{1.1}(t_{з.вх.2}^1)$ ($\Delta V_{сл.2}^{2.2}(t_{з.вх.2}^2)$) $>$ $\Delta V_{сл.2}^{1.1}(t_{з.вх.2}^1)$, так как температуры теплоносителя, материала насадки и кладки боковых стен выше, после прохода первой порции газа. Третий объем газа занимает объем слоя $\Delta V_{сл.1}^{3.3}(t_{з.вх.1}^3)$ высотой $\Delta h_1^{3.3}$. После четвертого $\Delta \tau$ ($\tau_{тек.4}^{1.4} = \Delta \tau_1^{1.1} + \Delta \tau_2^{1.2} + \Delta \tau_3^{1.3} + \Delta \tau_4^{1.4}$) первая порция перешла на свое $\Delta h_4^{1.1}$, вторая – на свое $\Delta h_3^{2.2}$, третья – на свое $\Delta h_2^{3.3}$ и т.д. Аналогично проходят по слою остальные объемы газа. Нижние объемы газа выталкивают верхние, которые уже уменьшились в объеме.

Предложенная схема расчета в отличие от [1 – 7] позволяет рассчитать: за какое время весь объем насадки заполнится газом, за какое время j -ая порция газа достигнет заданной высоты насадки, сколько объемов газа находится в насадке, через какое время последний объем газа, зашедший в насадку, достигнет конечной высоты слоя (например, при перекидке клапанов).

Теплообмен в насадке

Запишем уравнения теплового баланса для j -го элементарного объема газа i -го элементарного слоя материала в $(k+1)$ -ый момент времени с учетом тепловых потерь через огнеупорную кладку стен камеры за интервал времени $\Delta \tau$ на основании рассуждений, приведенных выше и в [10].

Элементарный j -ый объем газа, который пришел в i -ый слой, отдает часть теплоты материалу насадки и кладке боковых стен за время $\Delta \tau$, поэтому изменение энтальпии газа в $(k+1)$ -ый момент времени может быть определено так:

$$\Delta I_{z_i}^{k+1} = -\bar{Q}_i^{k+1} \cdot \Delta \tau = \Delta V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) \cdot (i_{z_{i-1}}^{k+1} - i_{z_i}^{k+1}), \text{ [Дж]}, \quad (3)$$

где $\Delta V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1})$ – j -ый элементарный объем газа, находящийся в состоянии теплообмена с i -ым элементарным слоем насадки и кладки боковых стен в течение $\Delta \tau$, m^3 ; $i_{z_{i-1}}^{k+1}$, $i_{z_i}^{k+1}$ – удельная энтальпия элементарного объема газа в $(i-1)$ -ом и i -ом элементарном слое в $(k+1)$ -ый момент времени при изменившемся $\Delta V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1})$, Дж/м³.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \Delta V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) &= V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) \cdot \Delta \tau = W_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) \cdot S_{ш} \cdot \Delta \tau = \\ &= W_{зс.i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) \cdot \varepsilon \cdot S_{ш} \cdot \Delta \tau = h_i^{j.k+1} \cdot \varepsilon \cdot S_{ш} = V_{сл.i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1}) \cdot \varepsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

где $V_{z_i}^{j.k+1}(t_{з.вх.i}^{k+1})$ – расход газа, м³/с.

Тогда выражение (3) примет вид:

$$\Delta V_{z_i}^{k+1} = \Delta V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}) \cdot \varepsilon \cdot C_z(t_{z,i}^k) \cdot (t_{z,i-1}^{k+1} - t_{z_i}^{k+1}), \quad (5)$$

где $C_z(t_{z,i}^k)$ – средняя теплоемкость газа при изменившемся объеме слоя $\Delta V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1})$, Дж/(м³·К).

Составим уравнение теплообмена для *i*-ого элементарного слоя в (*k*+1)-ый момент времени.

Тепловой поток от газа к поверхности материала и поверхности кладки можно выразить по закону Ньютона – Рихмана и записать для рассматриваемого случая так [Вт]:

$$Q_{T_i}^{k+1} = \alpha_{s.mi} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.mi}^{k+1}) \cdot \Delta S_{н.i} + \alpha_{s.кл.i} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.кл.i}^{k+1}) \cdot F_{бок.кл.i}, \quad (6)$$

где $\alpha_{s.mi}$, $\alpha_{s.кл.i}$ – поверхностный коэффициент теплоотдачи от газа к материалу и к кладке соответственно, Вт/(м²·К); $t_{нов.mi}^{k+1}$, $t_{нов.кл.i}^{k+1}$ – температура поверхности материала и кладки, °С; $F_{бок.кл.i} = \pi \cdot d_{ш} \cdot \Delta h_i^{j,k+1}$ – боковая поверхность внутренней кладки боковых стен насадки, м²; $d_{ш}$ – диаметр шахты насадки, м; $\Delta S_{н.i}$ – площадь поверхности нагрева материала в *i*-ом слое, м².

$$\text{Имея в виду, что } \Delta S_{н.i} = f \cdot \Delta V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}) = f \cdot \Delta h_i^{j,k+1} \cdot S_{ш}; \quad (7)$$

$$\alpha_{v.mi} = \alpha_{s.mi} \cdot f, \quad (8)$$

где f – удельная поверхность нагрева, м²/м³; $\alpha_{v.mi}$ – объемный коэффициент теплоотдачи от газа материалу, Вт/(м³·К).

Выражение для теплового потока от газа к поверхности материала и поверхности боковых стен кладки, например, для *j*-ого элементарного объема газа *i*-ого элементарного слоя, в (*k*+1)-ый момент времени:

$$\begin{aligned} Q_{T_i}^{j,k+1} &= \alpha_{s.mi} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.mi}^{k+1}) \cdot f \cdot \Delta h_i^{j,k+1} \cdot S_{ш} + \\ &+ \alpha_{s.кл.i} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.кл.i}^k) \cdot F_{бок.кл.i} = \\ &= \alpha_{v.mi} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.mi}^{k+1}) \cdot V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}) + \alpha_{s.кл.i} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.кл.i}^k) \cdot F_{бок.кл.i}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда уравнение теплового баланса для газа имеет вид:

$$\begin{aligned} V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}) \cdot \varepsilon \cdot C_z(t_{z,i}^k) \cdot (t_{z,i-1}^{j,k+1} - t_{z_i}^{j,k+1}) &= \\ &= \alpha_{v.mi} \cdot (t_{z_i}^{j,k+1} - t_{нов.mi}^{j,k+1}) \cdot \Delta V_{t_{z,вх.i}.сл.i}^{j,k} \cdot \Delta \tau + \\ &+ \alpha_{s.кл.i} \cdot (t_{z_i}^{j,k+1} - t_{нов.кл.i}^{j,k}) \cdot F_{бок.кл.i} \cdot \Delta \tau. \end{aligned} \quad (10)$$

При определении коэффициента теплоотдачи от газов к материалу насадке использовалась зависимость [8]:

$$\alpha_{v.mi} = 186 \cdot \frac{(t_{z_i}^k + 273)^{0.3} \cdot W_{z.1}^{j.k+1} (t_{z.0}^k)^{0.9}}{d^{0.75}} \quad (11)$$

где d – диаметр элемента насадки (шарика), м.

Интенсивность теплоотдачи от газов к внутренней боковой стенке кладки определялась по зависимости, рекомендуемой в [11]:

$$Nu_{\varepsilon,kl} = 0,09 \cdot Re_{\varepsilon}^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } 38 < Re_{\varepsilon} < 10^4, \quad (12)$$

где $Nu_{\varepsilon,kl} = \frac{\alpha_{s,kl} \cdot d_{\varepsilon}}{\lambda_2(t_{z_i}^k)}$ – число подобия Нуссельта; Pr – критерий

Прандтля; $Re_{\varepsilon} = \frac{4}{6 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \frac{W_{z.1}^{j.k+1} (t_{z.0}^k) \cdot d}{\nu_2(t_{z_i}^k)}$ – число подобия Рейнольдса;

$d_{\varepsilon} = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot d}{6 \cdot (1 - \varepsilon)}$ – эквивалентный диаметр элементарного слоя насадки,

м; $\lambda_2(t_{z_i}^k)$ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); $\nu_2(t_{z_i}^k)$ – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Составим уравнение теплового баланса для материала в i -ом слое насадки.

Изменение энтальпии материала при j -ом элементарном объеме газа в i -ом элементарном слое в $(k+1)$ -ый момент времени может быть определено:

$$\Delta I_{M_i}^{k+1} = \Delta m_M \cdot (i_{M_i}^{k+1} - i_{M_i}^k) = \Delta m_M \cdot C_M(t_{M_i}^k) \cdot (t_{M_i}^{k+1} - t_{M_i}^k), \quad (13)$$

где Δm_M – масса материала i -ого слоя, кг; $i_{M_i}^{k+1}$, $i_{M_i}^k$ – удельная энтальпия материала i -ого элементарного слоя в $(k+1)$ -ый и k -ый моменты времени, Дж/кг; $C_M(t_{M_i}^k)$ – средняя теплоемкость материала i -ого слоя, Дж/(кг·К); $t_{M_i}^{k+1}$, $t_{M_i}^k$ – среднemasсовая температура материала в i -ом слое в $(k+1)$ -ый и k -ый моменты времени, °С.

Учитывая, что

$$\Delta m_{M_i}^{k+1} = \Delta h_i^{j.k+1} \cdot S_{ш} \cdot \rho_{нас} = \Delta h_i^{j.k+1} \cdot S_{ш} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_M; \quad (14)$$

где $\rho_{нас}$ – насыпная плотность материала, кг/м³; ρ_M – плотность материала насадки, кг/м³.

Уравнение теплового баланса для материала получает вид:

$$\begin{aligned} & V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}) \cdot C_M(t_{M_i}^k) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_M \cdot (t_{M_i}^{k+1} - t_{M_i}^k) = \\ & = \alpha_{v.M_i} \cdot [t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.M_i}^{k+1}] \cdot \Delta \tau \cdot V_{сл.i}^{j,k+1}(t_{z,i-1}^{k+1}); \end{aligned} \quad (15)$$

$$t_{M_i}^{k+1} = t_{нов.M_i}^{k+1} - \frac{k_3 - 1}{k_3} \cdot \frac{\alpha_{s.M_i} \cdot (t_{z_i}^{k+1} - t_{нов.M_i}^{k+1}) \cdot \frac{d}{2}}{k_2 \cdot \lambda_M(t_{M_i}^k)}, \quad (16)$$

где k_2 – коэффициент усреднения плотности теплового потока по сечению элемента насадки; k_3 – коэффициент усреднения среднemasсовой температуры по сечению элемента насадки; $\lambda_M(t_{M_i}^k)$ – коэффициент теплопроводности материала насадки, Вт/(м·К).

Теплопередача через огнеупорную кладку стен камеры

Было принято, что стены кладки камеры имеют цилиндрическую форму (рис. 1). Расчет нагрева кладки стен и теплопередачи через них осуществлялся по конечно-разностным уравнениям, составленным на основе метода элементарных тепловых балансов.

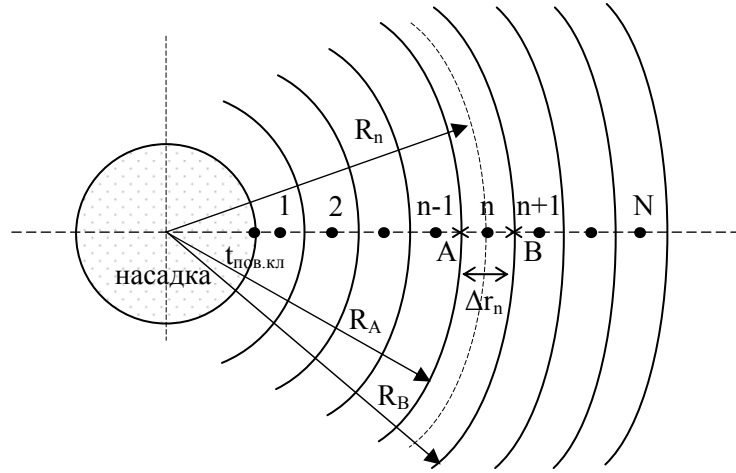


Рис. 1. Схема поперечного разреза насадки

Уравнение теплового баланса для n-го элементарного слоя огнеупорной кладки имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{кл} \cdot C_z(t_{кл_n}^k) \cdot V_{кл_n}}{\Delta \tau} \cdot (t_{кл_n}^{k+1} - t_{кл_n}^k) &= \frac{\lambda_z(t_{кл_n}^k) \cdot F_{вн.кл(A)}}{0,5 \cdot (\Delta r_n + \Delta r_{n-1})} \cdot (t_{кл_{n-1}}^{k+1} - t_{кл_n}^{k+1}) + \\ &+ \frac{\lambda_z(t_{кл_n}^k) \cdot F_{нар.кл(B)}}{0,5 \cdot (\Delta r_{n+1} + \Delta r_n)} \cdot (t_{кл_{n+1}}^{k+1} - t_{кл_n}^{k+1}); \end{aligned} \quad (17)$$

где n – номер элементарного слоя кладки (см. рис. 1); $\rho_{кл}$ – плотность материала кладки, кг/м³; $V_{кл_n}$ – элементарный объем слоя кладки, м³; $t_{кл}$ – температура кладки; $C_z(t_{кл}^k)$ – средняя удельная теплоемкость материала боковых стен кладки, Дж/(кг·К); $\lambda_z(t_{кл}^k)$ – коэффициент теплопроводности материала боковых стен кладки, Вт/(м·К); z – номер материала кладки (если кладка состоит из разных слоев огнеупоров); Δr_n – толщина n -го элементарного слоя кладки, м; $F_{вн.кл(A)}$ – внутренняя боковая поверхность n -го элементарного слоя, м²; $F_{нар.кл(B)}$ – наружная боковая поверхность n -го элементарного слоя, м².

$$\begin{aligned} V_{кл_n} &= S_{кл_n} \cdot \Delta h_i^{j.k+1} = \pi \cdot [R_A^2 - R_B^2] \cdot \Delta h_i^{j.k+1} = \\ &= \pi \cdot [(R_n + 0,5 \cdot \Delta r_n)^2 - (R_n - 0,5 \cdot \Delta r_n)^2] \cdot \Delta h_i^{j.k+1} = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot \Delta r_n \cdot \Delta h_i^{j.k+1}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $S_{кл_n}$ – площадь поперечного сечения n -го элементарного слоя кладки (кольца), м²; R_n – текущий радиус в n -ой точке, м.

$$F_{вн.кл(A)} = 2 \cdot \pi \cdot (R_n - 0,5 \cdot \Delta r_n) \cdot \Delta h_i^{j.k+1}. \quad (19)$$

$$F_{нар.кл(B)} = 2 \cdot \pi \cdot (R_n + 0,5 \cdot \Delta r_n) \cdot \Delta h_i^{j.k+1}. \quad (20)$$

Если боковые стены насадки изготовлены из нескольких видов огнеупорных материалов, то уравнение (17) учитывает это.

Граничные условия:

– для внутренней поверхности боковых стен кладки при $n = 1$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{кл} \cdot C_z(t_{кл}^k) \cdot V_{кл_1} \cdot (t_{кл_1}^{k+1} - t_{кл_1}^k)}{\Delta \tau} &= \frac{(t_{r1}^{k+1} - t_{кл_1}^{k+1}) \cdot F_{вн.кл(1)}}{\frac{1}{\sum \alpha_{s.кл}} + \frac{\Delta r_1}{2 \cdot \lambda_z(t_{кл_1}^k)}} + \\ &+ \frac{\lambda_z(t_{кл_1}^k) \cdot F_{нар.кл(1)} \cdot (t_{кл_2}^{k+1} - t_{кл_1}^{k+1})}{0,5 \cdot (\Delta r_2 + \Delta r_1)}; \end{aligned} \quad (21)$$

– для наружной поверхности боковых стен кладки при $n = N$

$$\frac{\rho_{кл} \cdot C_z(t_{клN}^k) \cdot V_{клN}}{\Delta\tau} \cdot (t_{клN}^{j.k+1} - t_{клN}^{j.k}) = \frac{\lambda_z(t_{клN}^k) \cdot F_{вн.кл(N)}}{0,5 \cdot (\Delta r_N + \Delta r_{N-1})} \cdot (t_{окр}^{k+1} - t_{клN}^{k+1}) + \frac{F_{нар.кл(N)}}{\frac{1}{\alpha_{нар}} + \frac{\Delta r_N}{2 \cdot \lambda_z(t_{клN}^k)}}, \quad (22)$$

где $\alpha_{нар}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности материала боковых стен кладки в окружающую среду, Вт/(м²·К); $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °С.

Алгоритм расчета

Ориентиром при выборе шага по времени $\Delta\tau$ может служить величина эквивалентного диаметра элемента слоя – $d_э$, который по физическим соображениям в первом приближении равен высоте первого элементарного слоя насадки.

Учитывая это, по заданной скорости теплоносителя на входе в насадку $W_{э.1}^{j.k+1}(t_{э.вх.1}^{k+1})$ выбираем $\Delta h_1^{1.1} \approx d_э$ и рассчитываем $\Delta\tau$ из соотношения (1). Это $\Delta\tau$ принимаем для всех порций газа ($\Delta\tau = const$). Заданное время нагрева насадки $\tau_{нагр}^{зад}$ разбиваем на $\Delta\tau$ для того, чтобы получить количество объемов газа, которые будут заходить в слой.

Для каждого j -ого объема газа по высоте слоя рассчитываем объем слоя $V_{сл.i}^{j.k+1}(t_{э.i-1}^{k+1})$, который он занял по высоте $\Delta h_i^{j.k+1}$ из соотношения (1), текущее время $\tau_{тек.i}^{j.m}$ и текущую координату $h_{тек.i}^{j.k+1}$. Интерполяцией определяем теплофизические свойства теплоносителя, материала слоя и боковых стен по температурам в предыдущий момент времени k на новой текущей координате $h_{тек.i}^{j.k+1}$.

На каждом новом шаге по высоте $\Delta h_i^{j.k+1}$ решается система трех уравнений (10), (15) и (16) и находятся температуры газа и материала $t_{э_i}^{k+1}$, $t_{нов.м_i}^{k+1}$, $t_{м_i}^{k+1}$ для i -ого элементарного слоя материала. По найденной температуре теплоносителя $t_{э_i}^{k+1}$ из уравнений (17),

(21) и (22) находится температурное распределение по толщине боковых стен кладки и температура на внутренней поверхности кладки $t_{нов.кл_i}^{k+1}$ в i -ом элементарном слое насадки. Далее уточняются теплофизические свойства для газа, материала и кладки по найденным температурам $t_{z_i}^{k+1}$, $t_{нов.м_i}^{k+1}$, $t_{м_i}^{k+1}$ и $t_{нов.кл_i}^{k+1}$. И еще раз уточняются температуры $t_{z_i}^{k+1}$, $t_{нов.м_i}^{k+1}$, $t_{м_i}^{k+1}$ по средним тепловым потокам [10]. После рассчитывается скорость на входе в следующий $(i+1)$ -ый слой $W_{ж.и+1}^{j,k+1}(t_{z.и+1}^{k+1})$, объем элементарного слоя, который займет измененный объем газа $V_{сл.и+1}^{j,k+1}(t_{z.i}^{k+1})$ высотой $\Delta h_{i+1}^{j,k+1}$. Расчет температур в $(k+2)$ -ый момент времени проводится аналогично. Программа выполняется до тех пор, пока заданная высота насадки не будет равна расчетной ($H_{нас} \approx h_{тек.i}^{j,k+1}$). Последний шаг по высоте рассчитывается как $\Delta h_{посл}^j = H_{нас} - h_{тек.i}^{j,k+1}$, при этом $\Delta \tau_{посл} = \Delta h_{посл}^j / W_{ж.посл}^{j,k+1}(t_{z.вх.посл}^{k+1})$. Аналогично проводится расчет для определения температур газа, материала и боковых стен кладки на последнем $\Delta h_{посл}^j$. Программа также рассчитывает необходимое количество шагов по высоте.

Результаты исследований

Была выполнена проверка адекватности предложенной математической модели ($\Delta h_i^{j,k+1} \neq const$) сравнением полученных результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований и расчетов, приведенных в [12] (табл. 1 и рис. 2).

Для расчета использовались такие исходные данные: камера насадки имеет форму цилиндра диаметром 0,2 м, высотой 0,55 м, тепловая изоляция – шамотная крошка с толщиной слоя 100 мм, насадка нагревается продуктами сгорания природного газа, $W_{z.1}^{j,k+1}(t_2 \text{ при н.у.}) = 0,35$ м/с. Материал насадки – корундовые шарики диаметром 18 – 23 мм (принято 20 мм), $\rho_m = 3020$ кг/м³, $\varepsilon = 0,42$.

Таблица 1

Сравнительная характеристика экспериментальных и расчетных
данных температуры при нагреве неподвижного слоя

Время, мин. (с)	Температура низа насадки, °С										
	1	2	3	4	5	6	7	8	8*	9	10
10 (600)	51	49	67	50	85	65	66	58	111	83	75
15 (900)	105	116	136	105	175	141	139	123	240	177	163
20 (1200)	208	219	233	192	298	255	242	221	380	308	284
25 (1500)	322	331	347	303	438	394	362	338	508	420	427
30 (1800)	460	433	464	423	579	541	484	460	618	600	573
35 (2100)	581	531	575	541	710	682	596	575	709	730	714

В таблице приняты следующие обозначения: 1 – эксперимент, описанный в [12]; 2 – результаты расчета из [12]; 3 – $\Delta h = const$; без усреднения по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь; 4 – $\Delta h = const$; с усреднением по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь; 5 – $\Delta h = const$; без усреднения по тепловому потоку, без учета тепловых потерь; 6 – $\Delta h = const$; с усреднением по тепловому потоку, без учета тепловых потерь; 7 – $W_{ж.и}^t \cdot \Delta \tau = \Delta h_i$; без усреднения по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь; 8 – $W_{ж.и}^t \cdot \Delta \tau = \Delta h_i$; с усреднением по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь; 8* – $W_{ж.и}^t \cdot \Delta \tau = \Delta h_i$; с усреднением по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь (без интерполяции); 9 – $W_{ж.и}^t \cdot \Delta \tau = \Delta h_i$; без усреднения по тепловому потоку, без учета тепловых потерь; 10 – $W_{ж.и}^t \cdot \Delta \tau = \Delta h_i$; с усреднением по тепловому потоку, без учета тепловых потерь.

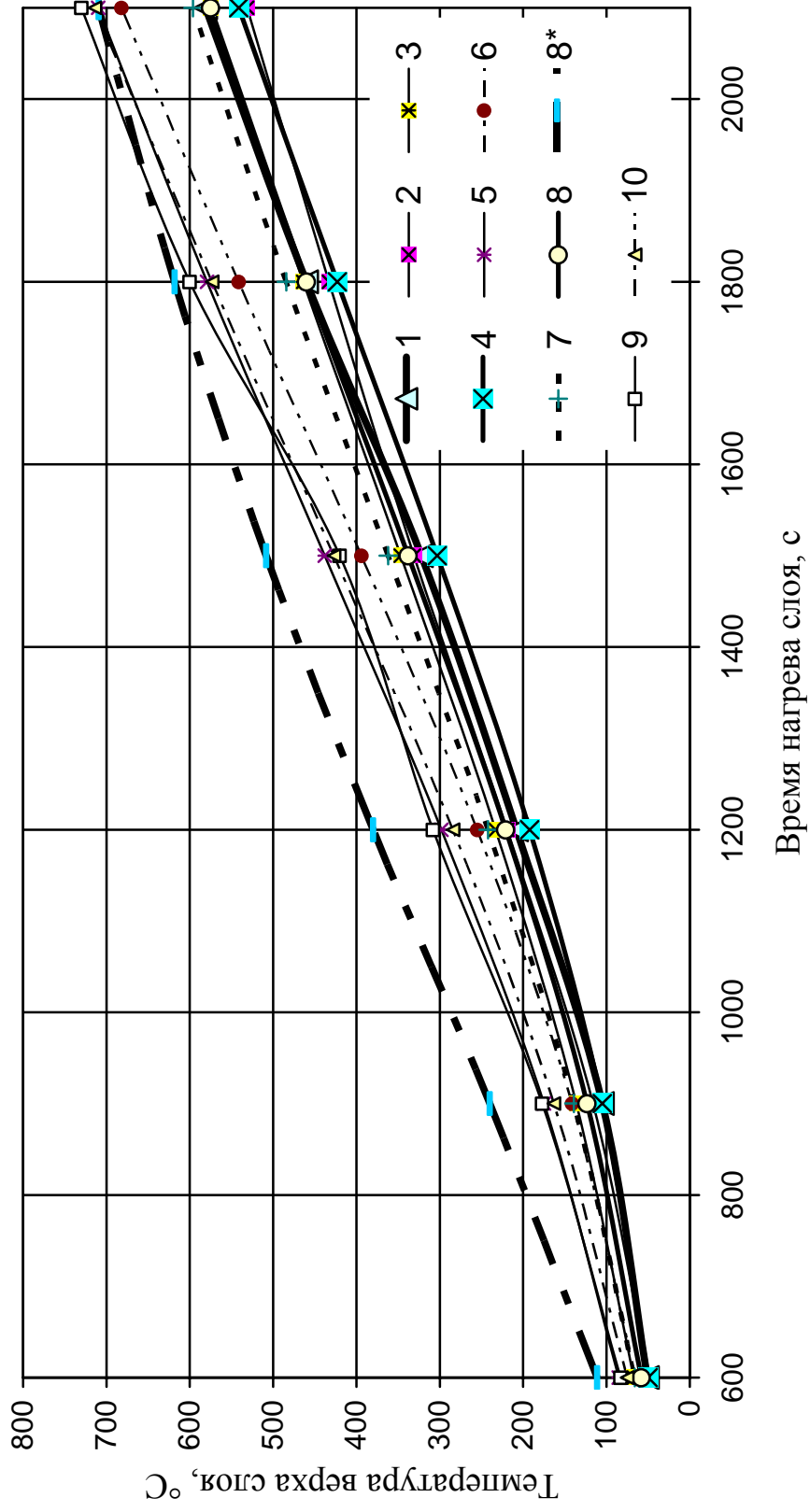


Рис. 2. Результаты эксперимента и расчетов

Было принято $t_{2.э.1}^{k+1} = 1200$ °С. Автор [12] указывает, что в экспериментальных исследованиях коэффициент расхода воздуха находился в пределах $1,62 \div 1,92$, в приведенных расчетах принят 1,8. Известно, что термопара находилась под одним слоем корундовых шариков, поэтому, на наш взгляд, она показывала среднюю температуру между газом и материалом насадки на высоте 0,530 – 0,532 м. Температуры в табл. 1 и на рис. 2 соответствуют месту установки термопары.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что предложенная методика расчета ($\Delta h_i^{j.k+1} \neq const$) с усреднением по тепловому потоку, с учетом тепловых потерь через боковые стены, при прочих равных условиях, дает результаты, более близкие к экспериментальным, чем, например, методика расчета [10] при $\Delta h_i^{j.k+1} = const$ с усреднением по тепловому потоку и с учетом потерь теплоты через боковые стены кладки. Если анализируется работа только разогрева насадки из холодного состояния, то обязательно необходимо учитывать потери через боковые стены огнеупорной кладки насадки, это видно из табл. 1 и рис. 2, так как большая часть теплоты тратится на аккумуляцию кладки.

Выводы

1. Представлена схема и алгоритм расчета неподвижного слоя, позволяющая учитывать изменение действительной скорости теплоносителя по высоте слоя.

2. Получены конечно-разностные уравнения для процесса нагрева неподвижного слоя материалов с учетом тепловых потерь через кладку на основании анализа уравнений, составленных методом элементарных тепловых балансов.

3. Показано влияние усреднения по тепловому потоку для разных условий расчета тепловых потоков на результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными.

4. Установлено, что при прочих равных условиях, предложенная схема расчета нагрева неподвижного слоя материалов с учетом влияния изменения скорости по высоте насадки и тепловых потерь через кладку дает наиболее точные результаты, близкие к экспериментальным.

Список литературы

1. Карп И.Н., Сезоненко Б.Д., Орлик В.Н. и др. Анализ процесса теплопередачи в регенеративных теплообменниках с шаровой насадкой // Доклады Академии наук Украины. – 1994. – № 6. – С. 77 – 79.

2. Тихонов Б.А., Гордон Я.М., Гурашвили В.А. и др. Особенности тепловой работы компактных слоевых регенераторов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 6. – С. 108 – 110.
3. Попов С.К. Математическая модель компактного регенератора // Пром. теплотехника. – 2001. – № 10. – С. 39 – 40.
4. Шкляр Ф.Р., Лекомцев Е.Д., Швыдкий В.С. Распределение температур в насадке с потерями тепла // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 8. – С. 140 – 144.
5. Затопляев Г.М. Расчет основных параметров шариковой насадки регенеративной горелки // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2001. – № 2. – С. 103 – 105.
6. Гайсинский И.М., Зайченко В.М., Игнатов И.И. и др. Двумерная математическая модель регенеративного теплообменника с шаровой насадкой // Промышленная теплотехника. – 1984. – № 3. – С. 45 – 49.
7. Федоров С.С. Математическая модель компактного регенератора с учетом влияния теплообмена в наднасадочном пространстве // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – С. 272 – 278.
8. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. Свердловск: Металлургиздат, 1957. – 279 с.
9. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Термодинамика и тепло-массоперенос. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
10. Абраменков Ю.Я., Сысоева Т.Е. Решение задачи нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала методом элементарных балансов // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – С. 49 – 58.
11. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.
12. Федоров С.С. Повышение эффективности использования топлива в энергетических и технологических агрегатах на основе автономных регенеративных подогревателей // Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2006. – 164 с.

Рукопись поступила 24.05.2008 г.