

А. Н. Александров
(СКБ-3)

ТЕПЛОБМЕН В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ РЕБРИСТО-ЗУБЧАТОМ РЕКУПЕРАТОРЕ

Рекуператоры значительно повышают экономичность работы нагревательных печей. Поэтому очень важно во время эксплуатации обеспечить такой тепловой режим рекуператора, при котором температура подогреваемого в нем воздуха будет максимальной, а температура стенок его элементов не превысит допустимой.

Так как в производственных условиях нагрузка печей и, следовательно, рекуператора изменяется в широких пределах, поставленная цель

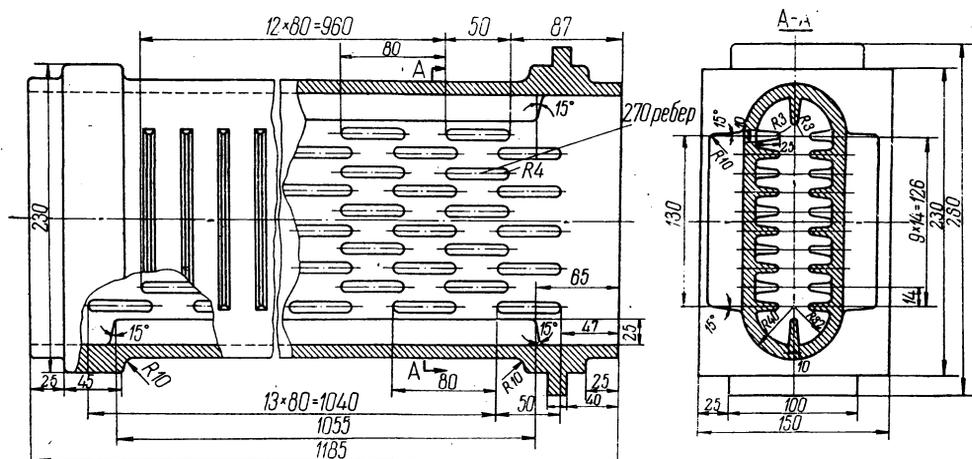


Рис. 1. Конструкция ребристо-зубчатого элемента.

достигается регулированием воздуха на разбавление дымовых газов. При программировании расхода воздуха на разбавление необходимо располагать математической моделью нагрева стенки наиболее нагреваемых участков рекуператора. Для этого требуется описать зависимости теплообмена с дымовой и воздушной сторон стенки от режимных и конструктивных параметров: расхода V_d и температуры t_d дымовых газов; расхода V_v воздуха через рекуператор; объема и геометрии предрекуператорного пространства; компоновки элементов рекуператора.

В данной статье излагается математическая модель теплообмена в ребристо-зубчатом рекуператоре, конструкция которого приведена на рис. 1, 2, а основные характеристики — в табл. 1. Для подобных рекуператоров известны [1, 2] данные по теплоотдаче лишь для низкотемпературных условий работы (температура дымовых газов до 900°C).

Анализ теплообмена по рядам показал, что в наиболее тяжелых условиях работают элементы 1-го ряда таких рекуператоров, так как с наружной стороны они подвергаются воздействию не только дымовых газов с высокой температурой, но и излучения предрекуператорного

пространства. Больше других нагреваются средние участки каждого элемента 1-го ряда. Это объясняется тем, что коэффициент теплоотдачи α_B с воздушной стороны на среднем участке ниже, чем на крайних участках, за счет теплоотдачи фланцев [2], в то время как коэффициент тепло-

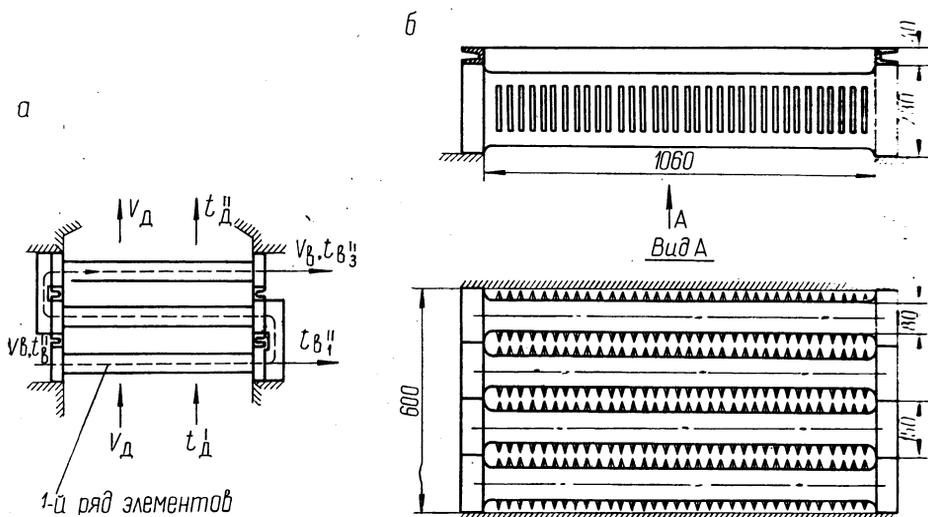


Рис. 2. Конструктивная схема рекуператора:

а — схема движения дымовых газов и воздуха; б — схема компоновки элементов 1-го ряда.

Таблица 1

Параметры и характеристики рекуператора			
конструктивные	величина	режимные	величина
Длина рабочей части элемента L , м	1,06	Температура дымовых газов t_d , °C	800—1250
Наружная поверхность элемента F_H , м ²	0,959	Температура подогрева воздуха в 1-м ряду t_B , °C	260—480
Внутренняя поверхность элемента F_B , м ²	1,206	Объем дымовых газов V_d , нм ³ /ч	800—2400
Эквивалентный диаметр* с дымовой стороны d_d , м	0,107	Объем подогреваемого воздуха V_B , нм ³ /ч	300—1300
Эквивалентный диаметр с воздушной стороны d_B , м	0,0294	Спротивление воздушного тракта при $V_B=725$ нм ³ /ч и $t_B=600$ °C, кгс/м ²	100
Количество элементов в ряду, шт.	4	Допускаемая температура стенки $t_{ст}$, °C	1050
Сечение для прохода дымовых газов S_d^{**} , м ²	0,249	Материал—сталь X18H9T	
Сечение для прохода воздуха S_B , м ²	0,0234		

Примечания: * Согласно работе [1], $d_э = \frac{4V_c}{F}$ (V_c — объем, занимаемый газом; F — поверхность, омываемая газом).

** При компоновке элементов согласно рис. 2.

отдачи с дымовой стороны α_d можно считать постоянным по всей длине элемента.

Температура стенки связана с перечисленными выше параметрами уравнением теплового баланса, которое для 1-го ряда элементов при стационарном режиме имеет вид

$$Q_{из} + \alpha_{d.k} F_H (\bar{t}_d - t_{ст}) - \alpha_B F_B (t_{ст} - \bar{t}_B) = 0, \quad (1)$$

где $Q_{из}$ — количество тепла, передаваемого элементам излучением из предрекуператорного пространства; $\alpha_{д.к}$ — конвективная составляющая теплоотдачи с дымовой стороны; $\bar{t}_д, \bar{t}_в$ — средние температуры соответственно дымовых газов и воздуха в 1-м ряду рекуператора.

В соответствии с экспериментально-аналитическим методом [3] для получения математического описания $Q_{из}, \alpha_{д.к}, \alpha_v$ были проведены эксперименты на объекте. Во время опытов фиксировались: V_v — расход воздуха, $t_{в.н}$ — начальная температура воздуха; $t_{в.к}$ — конечная температура воздуха после 1-го ряда элементов; V_r — расход газа на горение; $V_{в.г}$ — расход воздуха на горение; $V_{в.р}$ — расход воздуха на разбавление дымовых газов; $t_{д.н}$ — начальная температура дымовых газов; $t_{ст1}, t_{ст2}$ — температура стенок на средних участках двух элементов 1-го ряда. Величины $t_{д.н}, t_{в.н}, t_{в.к}$ измерялись с помощью отсасывающих термопар; $t_{ст1}, t_{ст2}$ — с помощью термопар, приваренных к нижним полукруглым поверхностям элементов.

Описание теплоотдачи с воздушной стороны производится по методике, изложенной в работе [1].

Теплоотдача с дымовой стороны происходит конвекцией и излучением. Для конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи можно записать:

$$\alpha_{д.к} = \frac{Q_v - Q_{из}}{(\bar{t}_д - \bar{t}_{ст}) F_n}; \quad (2)$$

где $Q_v = \bar{c}_v \bar{t}_v V_v$ — количество тепла, переданного воздуху;

$$\bar{t}_д = \frac{t_{д.н} + t_{д.к}}{2}; \quad (3)$$

$t_{д.н}, t_{д.к}$ — соответственно начальная и конечная температуры дымовых газов для 1-го ряда:

$$t_{д.к} = \frac{c_{д.н} t_{д.н} V_d - (Q_v - Q_{из})}{c_{д.к} V_d}; \quad (4)$$

$c_{д.н}, c_{д.к}$ — теплоемкость дымовых газов, соответствующая начальной $t_{д.н}$ и конечной $t_{д.к}$ температурам дыма. При расчете $t_{д.к}$ по формуле (4) принималось, что тепловые потери через кладку, приходящуюся на 1 ряд элементов, пренебрежимо малы; $\bar{t}_{ст}$ — средняя температура стенки (по показаниям двух термопар); F_n — наружная поверхность элементов.

Положим, как обычно принято [5], что результирующее излучение кладки предрекуператорной зоны равно нулю. Тогда количество тепла, передаваемого от газов и кладки на металл рекуператора, равно

$$Q_{из} = \sum_{i=1}^n C_i F_{oi} \left[\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где n — количество поверхностей делителей с различными угловыми коэффициентами системы кладка — металл; C_i — приведенные локальные коэффициенты излучения системы газ — кладка — i -я поверхность элемента:

$$C_i = \varepsilon_{mi} \varepsilon_r C_0 \frac{\Phi_{икл-м}^{\circ} (1 - \varepsilon_m) + 1}{\Phi_{икл-м}^{\circ} (1 - \varepsilon_r) [\varepsilon_{mi}^{\circ} + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_{mi}^{\circ})] + \varepsilon_r}; \quad (6)$$

$\Phi_{i\text{кл-м}}^{\circ}$ — угловой коэффициент переноса энергии излучения поверхности кладки на i -ю поверхность металла; ϵ_{mi}° — эффективная степень черноты i -й поверхности металла:

$$\epsilon_{mi}^{\circ} = \frac{1}{1 + \frac{F_{oi}}{F_i} \left(\frac{1}{\epsilon_m} - 1 \right)} \quad [5]; \quad (7)$$

F_i — соответственно неровная поверхность элемента рекуператора и натянутая на нее поверхность-делитель F_{oi} , не имеющая вогнутостей в сто-

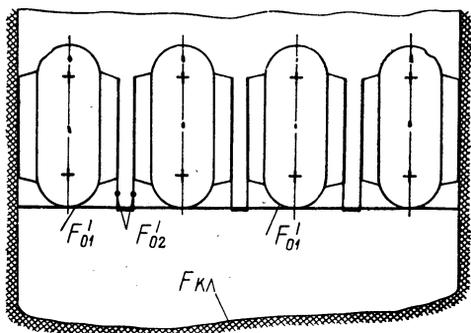


Рис. 3. Схема для расчета угловых коэффициентов системы кладка — поверхности элементов.

рону кладки; ϵ_m — степень черноты металла рекуператора; ϵ_r — степень черноты дымовых газов, определяемая содержанием в них CO_2 и H_2O :

$$\epsilon_r = 1 - \exp \left(-k_r \frac{p_{\Sigma}}{p_0} S_{\text{эф}} \right); \quad (8)$$

$p_{\Sigma} = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}$ — суммарное парциальное давление CO_2 и H_2O ; k_r — суммарный коэффициент ослабления в смесях CO_2 и H_2O :

$$k_r = \left(\frac{0,78 + 1,6 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_0}}{\sqrt{\frac{p_{\Sigma}}{p_0} S_{\text{эф}}}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_{\text{д.н}}}{1000} \right); \quad (9)$$

p_0 — атмосферное давление среды; $S_{\text{эф}} = \frac{3,6V_{\text{кл}}}{F_{\text{кл}}}$ — эффективная длина луча; $V_{\text{кл}}$, $F_{\text{кл}}$ — соответственно объем и поверхность предрекуператорного пространства. В наших опытах $S_{\text{эф}} = 0,66$ м, ϵ_m принималась равной 0,8.

Расчет парциальных давлений CO_2 и H_2O производился по приведенным ниже соотношениям, полученным с учетом того, что продукты полного сгорания Дашавского газа содержат 9,6% CO_2 и 18,8% H_2O , а при влажности 60% в воздухе, идущем на горение, содержится 1,2% H_2O :

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{10,6 \cdot 9,6 V_{\Gamma}}{V_{\text{д}}}; \quad (10)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{10,6 \cdot 9,6 V_{\Gamma} + 1,2 (V_{\text{в.г}} + V_{\text{в.р}})}{V_{\text{д}}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{д}} = V_{\Gamma} + V_{\text{в.г}} + V_{\text{в.р}}$.

При расчете угловых коэффициентов от кладки на металл элементов последние представлялись в виде параллелепипедов (рис. 3) с нижней

поверхностью-делителем F'_{01} и двумя боковыми поверхностями-делителями F'_{02} . Считалось, что верхние цилиндрические части поверхностей элементов в теплообмене излучением с газами не участвуют. Угловой коэффициент от кладки к нижней (суммарной) поверхности элементов подсчитывается по формуле

$$\Phi_{1 \text{ кл-м}}^{\circ} = \frac{\sum_{j=1}^k F'_{01}}{F_{\text{кл}}} \quad (k = 4); \quad (12)$$

угловой коэффициент от кладки к боковым поверхностям — по формуле

$$\Phi_{2 \text{ кл-м}}^{\circ} = \frac{\sum_{p=1}^d F'_{0\text{н}}}{F_{\text{кл}}} 2\Phi_{F'_{0\text{н}}-F'_{02}} \quad (d = 3), \quad (13)$$

где $F'_{0\text{н}}$ — часть нижней поверхности-делителя, излучающей на боковые стенки элемента; $\Phi_{F'_{0\text{н}}-F'_{02}}$ — угловой коэффициент переноса энергии с поверхности $F'_{0\text{н}}$ на боковую поверхность-делитель F'_{02} .

Для данной конструкции и компоновки элементов численные значения эффективной степени черноты для их нижних и боковых поверхностей оказались равны соответственно: $\epsilon_{\text{м}1}^{\circ} = 0,81$ и $\epsilon_{\text{м}2}^{\circ} = 0,995$; угловые коэффициенты $\Phi_{1 \text{ кл-м}}^{\circ} = 0,106$ и $\Phi_{2 \text{ кл-м}}^{\circ} = 0,0112$; поверхности-делители $F_{01} = \sum_{j=1}^k F'_{0\text{м}} = 0,575 \text{ м}^2$ и $F_{0\text{н}} = \sum_{p=1}^d F'_{0\text{н}} = 0,063 \text{ м}^2$.

Для рассматриваемой конструкции рекуператора количество тепла, передаваемого излучением элементам 1-го ряда, рассчитанное по приведенным выше соотношениям, составляет в различных опытах от 20 до 50%.

В результате обработки результатов опытов методом наименьших квадратов получены следующие критериальные зависимости для теплоотдачи конвекцией с воздушной и дымовой сторон 1-го ряда элементов рекуператора:

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu}_\text{в} &= 0,0311 \text{ Re}_\text{в}^{0,723}, \quad 10\,000 \geq \text{Re}_\text{в} \geq 2000; \\ \text{Nu}_\text{в} &= 0,0607 \text{ Re}_\text{в}^{0,647}, \quad 15\,000 \geq \text{Re}_\text{в} \geq 10\,000; \\ \text{Nu}_\text{д} &= 0,0195 \text{ Re}_\text{д}^{1,326}, \quad 7000 \geq \text{Re}_\text{д} \geq 2000. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Зависимость $\text{Nu}_\text{д} = 0,0195 \text{ Re}_\text{д}^{1,326}$ показана на рис. 4, из которого видно, что разброс экспериментальных данных по теплоотдаче конвекцией для дымовой стороны значителен. Учет излучения дыма на верхние части элементов не уменьшает рассеяния, так как количество тепла, передаваемого излучением дымовых газов, незначительно ввиду небольших значений $S_{\text{эф}}$. Такое рассеяние объясняется недостаточной точностью измерения температуры стенок рекуператора [4] и высокой чувствительностью коэффициента теплоотдачи с дымовой стороны к погрешности измерения температуры стенки. Так, максимальная разность температур стенки в опытах составила 80°C , а средняя разность по множеству всех опытов — 37°C . Уравнения (1), (5)—(13) и зависимости (14) представляют математическую модель теплообмена в ребристо-зубчатом рекуператоре.

В качестве критерия для оценки точности полученной модели принята величина

$$I_j = (\bar{t}_{стj}^э - t_{стj}^р),$$

где $j=1, 2, \dots, m$ — количество опытов; $\bar{t}_{стj}^э$ — средняя температура стенки, полученная в эксперименте; $t_{стj}^р$ — температура, рассчитанная по уравнению (1) для условий j -го опыта. Значения критерия находятся в пределах $40^\circ\text{C} \geq I_j \geq 0$, а среднее значение $\bar{I} = 17^\circ\text{C}$.

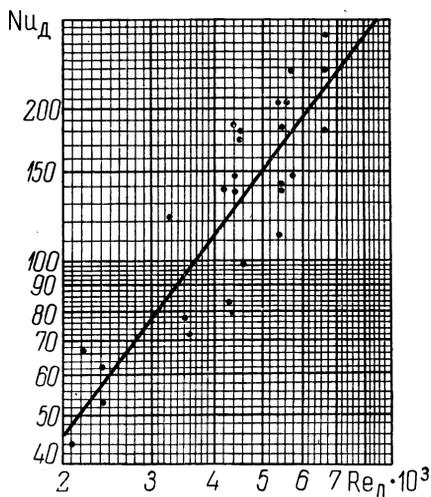


Рис. 4. Теплоотдача конвекцией с дымовой стороны 1-го ряда элементов.

Полученная математическая модель теплообмена позволяет рассчитывать температуру стенки рекуператора для любой совокупности входных параметров с точностью не ниже 40°C , что достаточно для практических целей.

Литература

1. Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., 1967.
2. Щербаков А. З., Жирнов Н. И. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление чугунного ребристо-зубчатого воздухоподогревателя. — «Теплоэнергетика», 1954, № 8.
3. Дудников Е. Г и др. Построение математических моделей химико-технологических объектов. Л., 1970.
4. Тебеньков Б. П. Исследование теплообмена в игольчатых рекуператорах. — «Сталь», 1954, № 11.
5. Ключников А. Д., Иванцов Г. П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М., 1970.