

Бойко И.И. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ

Антонов М.Е. – студент, НМетАУ

ВЫБОР МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА МНОГОСЕКЦИОННОГО РЕКУПЕРАТОРА С УЧЁТОМ ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе исследовано влияние распределения холодного теплоносителя по отдельным секциям рекуператора и его температур нагрева на суммарную поверхность нагрева рекуператора в целом. Определены варианты расчёта минимальной общей поверхности рекуператора с учётом ограничения режимов работы рекуператора допустимыми максимальными температурами стенок теплообменных элементов. По результатам исследования получены расчётные формулы и приведены графические результаты двухсекционного рекуператора для некоторых выбранных конкретных условий.

Введение

Существует большое многообразие рекуператоров, классифицировать которые можно по многим признакам. По материалу, из которого изготовлены рекуператоры, их можно разделить на две группы: керамические и металлические. Основным недостатком керамических рекуператоров является низкая газоплотность. Поэтому в последнее время наибольшее распространение получили металлические рекуператоры. Их основной недостаток – недостаточная стойкость теплообменных элементов к воздействию дымовых газов высокой температуры. Поэтому при выборе материала для изготовления теплообменных элементов необходимо учитывать схему движения теплоносителей и количество секций в рекуператоре, так как от этих факторов зависит температура нагрева теплообменных элементов в наиболее опасных точках.

Анализ последних публикаций и достижений

Из научных публикаций ([1] – [9] и др.) и результатов практической эксплуатации рекуператора известно, что в теплообменных секциях с прямоточной схемой движения теплоносителей теплообменные элементы нагреваются до меньших температур, чем в секциях с про-

тивоточной схемой движения теплоносителей при прочих равных условиях.

Поэтому в таких двух и более секционных рекуператорах возникает задача о распределении холодного теплоносителя по секциям и степени его нагрева в каждой из этих секций.

Решение данной проблемы рассматривается в различных научных публикациях ([1] – [9] и др.). Например, в работе [8] рассматривается вопрос об определении минимальной суммарной поверхности нагрева двухсекционного рекуператора для некоторых принятых исходных данных при условии, что температуры теплообменных элементов в опасных точках секций рекуператора не превышают допустимую рабочую температуру материала, из которого изготовлены теплообменные элементы. Данная работа решена расчётно-графическим методом. Результаты представлены на графиках.

В работе [9] рассматривается задача по определению минимально допустимых финансовых затрат для различных схем движения теплоносителей в секциях рекуператора при изменении такого фактора, как скорость движения теплоносителей, что приводит к увеличению интенсификации теплопередачи, уменьшению поверхности нагрева рекуператора, но увеличиваются затраты на транспортировку теплоносителя.

Постановка задачи

Одной из главных задач при выборе и расчёте многосекционного рекуператора является вопрос обеспечения минимальной общей поверхности рекуператора для конкретных исходных данных, при условии, что температуры нагрева теплообменных элементов секций рекуператора в наиболее опасных точках не должны превысить допустимой рабочей температуры материала, из которого изготовлены эти тепловые элементы.

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть совместную работу последовательно расположенных по дыму и параллельно по воздуху прямооточной и противоточной секций рекуператора (рис. 1).

Теоретическое исследование и решение поставленной задачи

Рассмотрим двухсекционный рекуператор, схема которого представлена на рис. 1. Первая секция этого рекуператора – прямооточная, вторая – противоточная.

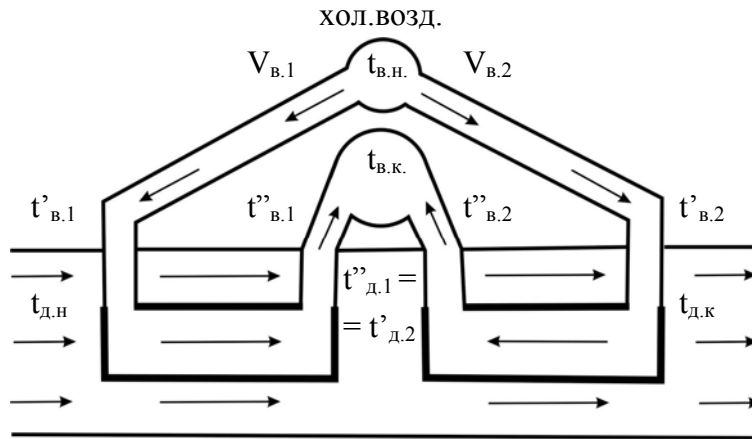


Рис. 1. Схема двухсекционного рекуператора: первая по ходу дыма – прямоточная, вторая – противоточная.
 $t'_{в.1}$ – начальная температура воздуха перед первой секцией; $t''_{в.1}$ – конечная температура воздуха после первой секции; $t''_{д.1}$ – конечная температура дымовых газов после первой секции; $t'_{д.2}$ – начальная температура дымовых газов перед второй секцией; $t_{в.н}$ – начальная температура воздуха перед рекуператором в целом; $t_{в.к}$ – конечная температура воздуха после рекуператора в целом; $t_{д.н}$ – начальная температура дымовых газов для рекуператора в целом; $t_{д.к}$ – конечная температура дымовых газов для рекуператора в целом

Такой выбор схемы рекуператора объясняется тем, что в прямоточных теплообменных секциях температура стенок теплообменных элементов имеет меньшее значение, чем при тех же условиях в противоточных секциях рекуператоров, что очень важно для обеспечения стойкости рекуператора в целом к воздействию высоких температур. Однако известно, что тепловая эффективность прямоточных схем рекуператоров значительно ниже, чем противоточных схем.

Выражения, описывающие работу прямоточной схемы, имеют вид:

$$\theta_{\partial 1} = \frac{1 - e^{-(1+N_1) \cdot M_1}}{1 + N_1} \quad (1)$$

или

$$\theta_{\partial 1} = N_1 \cdot \frac{1 - e^{-(1+N_1) \cdot M_1}}{1 + N_1}, \quad (2)$$

где $N_1 = \frac{W_{\partial 1}}{W_{\partial 1}}$ – отношение водяных эквивалентов; (3)

$$W_{\partial 1} = C_{\partial} \cdot V_{\partial 1} - \text{водяной эквивалент потока дымовых газов}; \quad (4)$$

$$W_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon} \cdot V_{\varepsilon 1} - \text{водяной эквивалент потока воздуха}; \quad (5)$$

$V_{\partial 1}, V_{\varepsilon 1}$ – соответственно секционные расходы дымовых газов и воздуха;

$$M_1 = \frac{k \cdot F_1}{W_{\partial 1}} - \text{безразмерная поверхность первой секции рекуператора}; \quad (6)$$

F_1 – площадь поверхности секции рекуператора.

$$\theta_{\partial 1} = \frac{t'_{\partial 1} - t''_{\partial 1}}{t'_{\partial 1} - t'_{\varepsilon 1}} - \text{безразмерная температура потока дымовых газов в прямооточной секции рекуператора}; \quad (7)$$

$$\theta_{\varepsilon 1} = \frac{t''_{\varepsilon 1} - t'_{\varepsilon 1}}{t'_{\partial 1} - t'_{\varepsilon 1}} - \text{безразмерная температура нагрева потока воздуха в прямооточной секции рекуператора}. \quad (7a)$$

В принятой схеме рекуператора, представленного на рисунке 1:

$$t'_{\partial 1} = t_{\partial n}; \quad t'_{\varepsilon 1} = t_{\varepsilon n}.$$

Выражения (1) и (2) можно решить относительно M_1 . наиболее удобно выражение (1):

$$M_1 = -\frac{\ln[1 - \theta_{\partial 1} \cdot (1 + N_1)]}{1 + N_1}. \quad (8)$$

Учтём, что $\theta_{\varepsilon 1} = N_1 \cdot \theta_{\partial 1}$ или $\theta_{\partial 1} = \theta_{\varepsilon 1} / N_1$, тогда:

$$M_1 = -\frac{\ln\left[1 - \theta_{\varepsilon 1} \cdot \frac{(1 + N_1)}{N_1}\right]}{1 + N_1}. \quad (9)$$

Запишем аналогичные уравнения для противоточной секции рекуператора, параметры которой обозначим индексом “2”.

$$\theta_{\partial 2} = \frac{1 - e^{-(1-N_2) \cdot M_2}}{1 - N_2 \cdot e^{-(1-N_2) \cdot M_2}} \quad (10)$$

или

$$\theta_{\varepsilon 2} = N_2 \frac{1 - e^{-(1-N_2) \cdot M_2}}{1 - N_2 \cdot e^{-(1-N_2) \cdot M_2}}. \quad (11)$$

Запишем эти выражения относительно M_2 :

$$M_2 = -\frac{1}{1 - N_2} \cdot [\ln(1 - \theta_{\partial 2}) - \ln(1 - \theta_{\partial 2} \cdot N_2)]. \quad (12)$$

Учитывая, что $\theta_{\delta 2} = N_2 \cdot \theta_{\delta 2}$ или $\theta_{\delta 2} = \theta_{\delta 2} / N_2$, тогда:

$$M_2 = \frac{1}{1 - N_2} \cdot \left[\ln(1 - \theta_{\delta 2}) - \ln\left(1 - \frac{\theta_{\delta 2}}{N_2}\right) \right], \quad (13)$$

где

$$\theta_{\delta 2} = \frac{t'_{\delta 2} - t''_{\delta 2}}{t'_{\delta 2} - t_{\delta 2}}; \quad \theta_{\delta 2} = \frac{t''_{\delta 2} - t'_{\delta 2}}{t_{\delta 2} - t_{\delta 2}}. \quad (14)$$

В принятой схеме рекуператора, представленной на рис. 1:

$$t'_{\delta 2} = t''_{\delta 1}; \quad t''_{\delta 2} = t_{\delta k}; \quad t_{\delta 2} = t_{\delta n};$$

$$N_2 = \frac{W_{\delta 2}}{W_{\delta 2}} - \text{отношение водяных эквивалентов для второй секции}; \quad (15)$$

$$M_2 = \frac{k \cdot F_2}{W_{\delta 2}} - \text{безразмерная поверхность второй секции рекуператора}. \quad (16)$$

Отметим, что если какой-либо параметр записывается без индекса, то он относится к указанному рекуператору в целом:

$t_{\delta n}, t_{\delta k}, t_{\delta n}, t_{\delta k}$ – начальные и конечные температуры теплоносителей рекуператора;

V_{δ}, V_{δ} – секундные расходы дымовых газов и воздуха в целом для рекуператора;

$V_{\delta 1}, V_{\delta 1}, V_{\delta 2}, V_{\delta 2}$ – расходы дымовых газов и воздуха в первой и во второй секциях рекуператора.

Для принципиальной схемы данного рекуператора:

$$V_{\delta 1} = V_{\delta 2} = V_{\delta}; \quad V_{\delta 1} = V_{\delta} \cdot x; \quad V_{\delta 2} = V_{\delta} \cdot (1-x), \quad (17)$$

где x – доля расхода воздуха на первую секцию от общего расхода воздуха на рекуператор.

Тогда: $W_{\delta 1} = W_{\delta} \cdot x; \quad W_{\delta 2} = W_{\delta} \cdot (1-x);$

$$N_1 = N/x; \quad N_2 = N/(1-x). \quad (18)$$

Определим теперь общую безразмерную поверхность рекуператора в целом M_{Σ} , зная поверхности отдельных секций рекуператора:

$$M_{\Sigma} = M_1 + M_2 = \frac{k \cdot F_1}{W_{\delta}} + \frac{k \cdot F_2}{W_{\delta}};$$

$$M_{\Sigma} = -\frac{\ln\left[1 - \theta_{\epsilon 1} \cdot \frac{(1 + N_1)}{N_1}\right]}{1 + N_1} + \frac{1}{1 - N_2} \cdot \left[\ln(1 - \theta_{\epsilon 2}) - \ln\left(1 - \frac{\theta_{\epsilon 2}}{N_2}\right) \right]. \quad (19)$$

В общем виде: $M_{\Sigma} = f(\theta_{\epsilon 2}; \theta_{\epsilon 1}; N_1; N_2)$, где N_1 и N_2 зависят от x .

Если задаться $\theta_{\epsilon 1}$ и заменить в выражении (19) $\theta_{\epsilon 2}$ через $\theta_{\epsilon 1}$ и известные исходные данные, то для принятых условий легко определить M_{Σ} . Таким образом, необходимо найти связь $\theta_{\epsilon 2} = f(\theta_{\epsilon 1}; N; x)$ и подставить эту связь в выражение (19).

Рассмотрев зависимость общей энтальпии воздуха от энтальпий потоков воздуха в первой и второй секциях рекуператора получаем выражение:

$$t_{\epsilon k} = t_{\epsilon 1}'' \cdot x + t_{\epsilon 2}'' \cdot (1 - x), \quad (20)$$

$$\text{где } t_{\epsilon 1}'' = t_{\epsilon H} + (t_{\epsilon H} - t_{\epsilon H}) \cdot \theta_{\epsilon 1}; \quad (21)$$

$$t_{\epsilon 2}'' = t_{\epsilon H} + (t_{\epsilon H} - t_{\epsilon H}) \cdot \theta_{\epsilon 2}. \quad (22)$$

Выражения (21) и (22) подставим в (20). После преобразования получим:

$$\theta_{\epsilon k} = \theta_{\epsilon 1} \cdot x + \frac{N - \theta_{\epsilon 1} \cdot x}{N} \cdot \theta_{\epsilon 2} \cdot (1 - x). \quad (23)$$

Решим это выражение относительно $\theta_{\epsilon 2}$:

$$\theta_{\epsilon 2} = \frac{\theta_{\epsilon k} - \theta_{\epsilon 1} \cdot x}{(1 - x) \cdot \left(1 - \frac{\theta_{\epsilon 1} \cdot x}{N}\right)}. \quad (24)$$

Полученное выражение необходимо подставить в (19):

$$M_{\Sigma} = -\frac{\ln\left[1 - \theta_{\epsilon 1} \cdot \frac{(1 + \frac{N}{x})}{N}\right]}{1 + \frac{N}{x}} + \frac{1}{1 - \frac{N}{1 - x}} \cdot \left[\ln\left(1 - \frac{\theta_{\epsilon k} - \theta_{\epsilon 1} \cdot x}{(1 - x) \cdot \left(1 - \frac{\theta_{\epsilon 1} \cdot x}{N}\right)}\right) - \ln\left(1 - \frac{\frac{\theta_{\epsilon k} - \theta_{\epsilon 1} \cdot x}{(1 - x) \cdot \left(1 - \frac{\theta_{\epsilon 1} \cdot x}{N}\right)}}{\frac{N}{1 - x}}\right) \right] \quad (25)$$

Далее закончить задачу можно двумя путями – или расчётным, задаваясь исходными данными и определяя M_{Σ} по выражению (25) для отдельных точек, или аналитически, для чего необходимо определить производную M_{Σ} по $\theta_{\epsilon 1}$, приравнять её нулю и сразу определить минимальное значение $M_{\Sigma \min}$ для принятых исходных данных, считая

параметр x величиной постоянной.

Для решения задачи воспользуемся вторым способом. Найдём производную M_Σ по θ_{e1} :

$$\frac{dM_\Sigma}{d\theta_{e1}} = -(\theta_{e1} - \theta_{ek}) \cdot \frac{x \cdot N}{(N - x \cdot N - \theta_{e1} \cdot x + \theta_{e1} \cdot x^2 - N \cdot \theta_{ek} + N \cdot \theta_{e1} \cdot x) \cdot (-N + \theta_{e1} \cdot x + \theta_{e1} \cdot N)}. \quad (26)$$

Для определения минимального значения M_Σ приравняем (26) нулю:

$$\frac{dM_\Sigma}{d\theta_{e1}} = 0. \quad (27)$$

Конкретный пример расчёта выполним для следующих исходных данных: $N=1.2$, $\theta_{вк}=0.6$, $x=0.1$.

Из выражений (26) и (27) определяем θ_{e1} , при котором M_Σ будет минимальным: $\theta_{e1}=0,6$.

Из выражения (25) определяем M_Σ : $M_\Sigma=1,151$.

Результаты расчётов, полученные при изменении x от 0.1 до 0.7, для наглядности представим на графике (рис. 2).

Ограничивающим фактором при работе рекуператора являются температуры стенок теплообменных элементов в наиболее опасных “горячих” точках, поэтому выбор режима работы и рациональных поверхностей нагрева каждой из секций нужно обязательно проводить с учётом уровня температур в опасных точках теплообменника.

Расчёты показывают, что наиболее опасные точки, в которых температуры стенки максимальны, расположены в рассматриваемой конструкции рекуператора в местах выхода нагретого воздуха в каждой из секций. Температуры в этих точках будем обозначать t_{cm1} – для первой секции и t_{cm2} – для второй секции.

С достаточной для качественного анализа точностью эти температуры можно определить из выражений:

$$\theta_{cm1} = \theta_{e1} + \frac{k}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\theta_{e1} \cdot x}{2 \cdot N} - \theta_{e1}\right); \quad (28)$$

$$\theta_{cm2} = \left(1 - \frac{\theta_{e1} \cdot x}{N}\right) \left(\theta_{e1} + \frac{k}{\alpha} \cdot (1 - \theta_{e2})\right), \quad (29)$$

$$\text{где } \theta_{cm1} = \frac{t_{cm1} - t_{вн}}{t_{дн} - t_{вн}}; \quad \theta_{cm2} = \frac{t_{cm2} - t_{вн}}{t_{дн} - t_{вн}}, \quad (30)$$

$\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны.

Результаты представим на графике (рис. 3) под графиком (рис. 2).

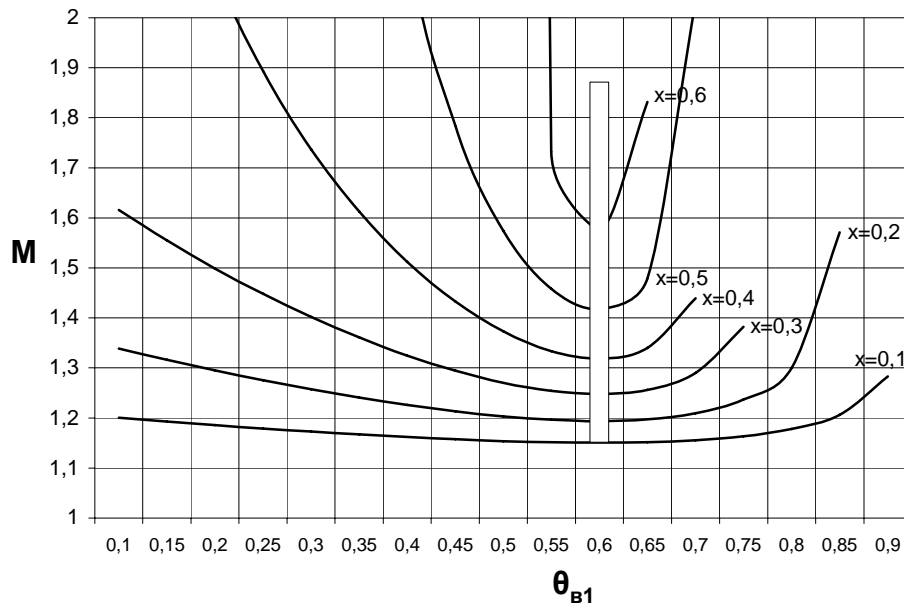


Рис. 2. График зависимости общей поверхности рекуператора в целом от относительной температуры нагрева воздуха в первой секции

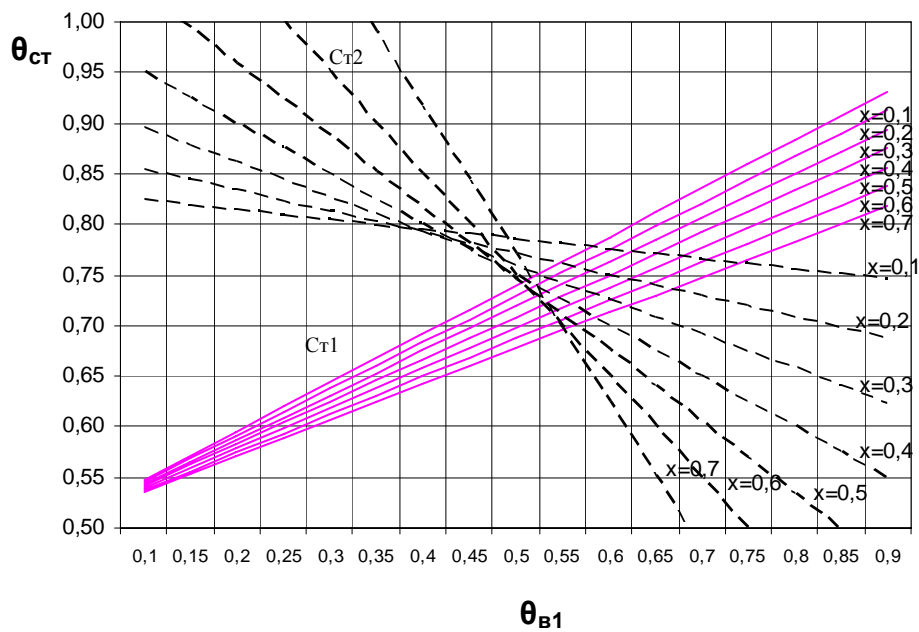


Рис. 3. График зависимости относительной температуры стенок рекуператора в наиболее опасных точках от относительной температуры нагрева воздуха в первой секции

Выводы

Используя полученные и приведенные в работе расчетные выражения можно легко определить оптимальные параметры работы и геометрии для каждой секции рекуператора. При этом температура в наиболее опасных точках рекуператора будет ниже, чем допустимая рабочая температура материала, из которого изготовлены теплообменные элементы рекуператора.

Список литературы

1. Рабинович Г.Д. Теория теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов. – Минск: Издательство АН БССР, 1963. – 137 с.
2. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Metallurgia, 1975. – 294 с.
3. Осипова В.А. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
4. Минаев А.Н., Гольдфарб Э.М., Губинский В.И., Бойко И.И. Моделирование тепловой работы печей: Учебное пособие. – Днепропетровск: ДМетИ, 1986. – 88 с.
5. Иванцов Г.П. Теплотехника слитка и печей. – М.: Metallurgиздат, 1953. – 332 с.
6. Ростоцкий С.Е. Расчёт рекуператоров, основанный на гидродинамической теории теплообмена // Теплотехника слитков и печей: Сб. научн. тр. – М.: Metallurgиздат, 1953. – С. 5 – 12.
7. Кейс Б.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 211 с.
8. Бойко И.И., Ибряев В.С., Минаев А.Н., Пора-Леонович Л.В. О выборе схемы движения теплоносителей в металлических рекуператорах // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – № 9. – 1978.
9. Ибряев В.С., Розенгарт Ю.И., Потапов Б.Б., Бойко И.И. Оптимизация поверхности теплообмена рекуператоров с различными схемами движения теплоносителей // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – № 8. – 1981.

Рукопись поступила 28.04.05.