



Научная статья
УДК 621.365.4 + 536.24.023

РАСЧЕТ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫХ РЕКУПЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Е.А. Оленев^{1,*}

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

* E-mail: olenevea@mail.ru

Аннотация. Предлагается аналитический метод для расчета комбинированных рекуператоров и других теплотехнических устройств. Полученные формулы позволяют рассчитывать на компьютере без использования номограмм, таблиц и графиков степень черноты углекислого газа и водяного пара, коэффициенты теплоотдачи с воздушной и дымовой сторон, а также коэффициент теплопередачи теплопередающей поверхности аппарата. Это значительно облегчает работу при проектировании теплотехнических устройств, в которых, как известно, определение указанных коэффициентов является наиболее трудным этапом расчета. По выведенной формуле (доверительная вероятность $P_d = 0,9$), погрешность аналитического вычисления степени черноты продуктов сгорания не превышает 5%, что является вполне приемлемым для практических расчетов. Предложенные для описания физических параметров дымовых газов и воздуха формулы способствуют простому получению необходимых данных для любых значений температур, в том числе, и дробных. Выражение для определения температуры дымовых газов, выходящих из зоны теплообмена, позволяет строго математически вычислять их температуру без какого-либо волевого или интуитивного назначения ее величины. Разработанные математические модели также дают возможность прогнозировать работу тепловых устройств и при необходимости управлять ими в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: *теплота; степень черноты; излучение; лучистая энергия; рекуператор.*

Для цитирования: Оленев Е.А. Расчет радиационно-конвективных рекуператорных установок // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №2. С. 51–63.

Originalarticle

CALCULATION OF RADIATION-CONVECTIVE RECUPERATOR INSTALLATIONS

E.A. Olenev^{1,*}

¹Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia

*E-mail: olenevea@mail.ru

Abstract. We propose an analytical method for calculating combined heat recuperators and other heat engineering devices. The obtained formulas allow calculating on a computer without using nomograms, tables and graphs the degree of blackness of carbon dioxide and water vapor, heat transfer coefficients from the air and smoke sides, as well as the heat transfer coefficient of the heat transfer surface of the apparatus. This greatly facilitates the work in the design of thermal engineering devices, in which, as is known, the determination of these coefficients is the most difficult stage of calculation. According to the derived formula (confidence probability $P_r = 0,9$), the error of analytical

calculation of the degree of blackness of combustion products does not exceed 5%, which is quite acceptable for practical calculations. The formulas proposed to describe the physical parameters of flue gases and air contribute to the simple obtaining of the necessary data for any temperature values, including fractional ones. The expression for determining the temperature of flue gases leaving the heat exchange zone allows you to calculate their temperature strictly mathematically without any volitional or intuitive assignment of its magnitude. The developed mathematical models also make it possible to predict the operation of thermal devices and, if necessary, control them in real time.

Keywords: heat; blackness extent; emanation; radiant energy; recuperator.

Forcitation: Olenev E.A. Calculation of radiation-convective recuperator instalations. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No. 2. pp. 51–63.

Введение

Нагревательные и термические печи в различных отраслях народного хозяйства являются одними из основных потребителей наиболее ценных сортов топлива, таких как газ и каменный уголь. Важным направлением пути повышения термического КПД печей, приводящим к экономии топлива, является возврат в печь части тепла, уходящего с дымовыми газами, путем подогрева в рекуператорах (теплообменниках) воздуха, подаваемого в топку, а также горючего газа.

Кроме того, подогрев воздуха способствует повышению температуры продуктов сгорания топлива, что позволяет осуществить полную или частичную замену высококалорийного топлива на низкокалорийное.

В высокотемпературных энергетических устройствах лучистый теплообмен является доминирующим, поэтому при температурах дымовых газов порядка 1000 °С для высокотемпературного подогрева воздуха или газа применяются радиационные рекуператоры, которые способны нести большую тепловую нагрузку на поверхности теплообмена по сравнению с конвективными рекуператорами [1]. Однако посредством радиационных рекуператоров нельзя достаточно глубоко использовать тепло дымовых газов, поскольку их температура на выходе составляет величину 650 – 850 °С. Поэтому для наибольшего использования тепла применяют комбинированные рекуператоры: радиационно-конвективные, термоблочно-игольчатые и т.д.

В радиационно-конвективных рекуператорных установках дымовые газы последовательно проходят сначала радиационный рекуператор, а затем конвективный, каждый из которых обслуживает соответствующую температурную зону. Так, в радиационном рекуператоре температура дымовых газов понижается до 750 – 850, а в конвективном – до 350 – 450 °С. Таким образом, вследствие указанной комбинации тепловых установок достигается весьма полное использование тепла дымовых газов от 1100 – 1600 до 350 – 450 °С.

Методика расчета таких установок, созданная еще в прошлом веке, все время совершенствовалась, но не претерпела существенных изменений и по сей день изобилует множеством графиков и номограмм, что не всегда удобно в пользовании. Относительно большая кривизна линий делает экстраполяцию (и интерполяцию) трудоемкой, а логарифмическая шкала номограмм усложняет отсчет, что, в конечном счете, снижает точность расчетов. Существенно затрудняется также математическое моделирование теплового процесса, его прогнозирование, автоматизированный расчет коэффициентов теплоотдачи, теплопередачи и других параметров. Предлагаемый аналитический метод позволяет производить расчеты без использования графического материала, что позволяет по существу формализовать всю расчетную процедуру рекуператора.

Аналитический расчет коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием

Как известно, в основу практических расчетов лучеиспускания газов положен закон четвертой степени абсолютной температуры – закон Стефана-Больцмана. Опытные данные по излучению газов обычно даются в виде зависимости



$$\epsilon_{\Gamma} = f(t, pS_{\text{эф}}),$$

где ϵ_{Γ} – относительная излучательная способность или степень черноты газа; t – температура газа; p – парциальное давление газа; $S_{\text{эф}}$ – эффективная длина пути луча, м.

Для газового объема произвольной формы эффективную длину пути луча рассчитывают по формуле

$$S_{\text{эф}} = 3,6 \cdot V_{\Gamma} / F_{\Gamma},$$

где V_{Γ} – объем, занимаемый газом, м³; F_{Γ} – площадь оболочки, в которую заключен газ, м².

Степень черноты газа зависит от его состава, температуры и объема, который занимает газ. Для продуктов сгорания энергетических топлив степень черноты газа определяют по выражению

$$\epsilon_{\Gamma} = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}},$$

где ϵ_{CO_2} – степень черноты углекислого газа; $\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$ – условная степень черноты водяного пара; β – поправочный коэффициент, учитывающий особенности излучения водяного пара; $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \beta \cdot \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$ – степень черноты водяного пара.

В соответствии с номограммами, приведенными в литературе, например [1, 2, 3, 5], для различных значений $pS_{\text{эф}}$ (кПа·м) и температур (°C) автором были разработаны математические формулы, выражающие относительную излучательную способность (или степень черноты) углекислого газа (1) и водяного пара (2)

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{CO}_2} = & 10^{-6} t \left[8,12 - 2,8 \cdot \lg^2(0,2x) - 29,7 \cdot \lg(17,2x) \right] + \frac{x^{0,181}}{5,92} - 0,0944 - \\ & - 0,022 \cdot \lg^{1,1} \left[x + 0,48 + 1,16 \cdot \lg^{2,8}(x + 12) - 0,044x^{1,2} + \frac{4}{e^{0,5(x-5)} + e^{-0,6(x-5)}} - \frac{0,47}{x + 0,3} \right] \times \\ & \times \exp - \left\{ \left[0,00213 - \left((0,00189 \cdot \lg x)^2 \right)^{0,81} \right] t \right\}^{2,5+0,000006 \left(x^{1,16} - 130 \right)^2} - 1,15 \cdot 10^{-5} t \times \\ & \times \left[\frac{0,018}{x^{0,7}} + 0,01 \cdot (7,4 \cdot \lg x - 0,3) - 0,01 - \frac{0,29}{e^{0,58(x-2,8)} + e^{-0,56(x-4,2)}} - \frac{0,0005}{x + 0,3} - 0,02x^{0,1} \right] + \\ & + \frac{\left(0,04 + \frac{0,3}{\exp 0,54(x-6,6) + \exp - 0,48(x-6,6)} - \frac{0,0005}{x + 0,3} - 0,02x^{0,1} \right) \cdot \left(\frac{x^{0,7}}{18} - 0,2 \right)}{\exp 0,0033(t - 1400) + \exp - 0,0033(t - 1400)}, \quad (1) \end{aligned}$$

где $x = p_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}}$, кПа·м, может изменяться от 0,15 до 200, а t , °C, = t_{CO_2} – от 200 до 2000; в этой формуле число = 2,7182818.

$$\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = \exp \left[\begin{aligned} & \left(0,6024 + 2,25 \cdot 10^{-4} t \right) \ln y - \left(0,034 + 1,13 \cdot 10^{-5} t \right) \ln^2 y - \\ & - 15 \cdot 10^{-8} t \frac{30 + y^3}{y^2} - 1,37 \cdot 10^{-3} t - 2,653 \end{aligned} \right] -$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\sqrt{y} - 0,4725}{105} \cdot \left(\frac{300 - 5y^{0,48}}{\sqrt{y}} \right) - \left[(0,00156t)^{3,6 - 0,86 \lg y} \right] + \\
 & + 10^{0,4453} \cdot \left[7 - \lg^2(0,032 y) \right]^{1,0165} - 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot y - 5 - \\
 & - 2,5 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{1,8-3y} - 10^{-6} t \left(2,6 \lg y + 0,9 - \frac{25}{e^{8(\lg y - 1,8)} + e^{-10,5(\lg y - 1,8)}} \right), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $y = p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}$, кПа·м, может изменяться от 0,5 до 600, а t , °С, = $t_{\text{H}_2\text{O}}$ – от 100 до 2000; $e = 2,7182818$.

Для водяного пара влияние p несколько сильнее, чем $S_{\text{эф}}$, поэтому значения $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$, найденное по формуле (2), необходимо умножить на поправочный коэффициент β , зависящий от парциального давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$. Также в соответствии с номограммами для нахождения β автором было получено следующее аналитическое выражение для β

$$\beta = 1 + p_{\text{H}_2\text{O}}^{0,8} \left[\frac{0,85 - \lg y + \frac{0,6}{e^{-5,5 \cdot (\lg y + 2,1)} + e^{5,5 \cdot (\lg y + 2,1)}}}{4,6} - \frac{1}{\left[e^{1,9 \cdot (\lg y + 3,88)} + e^{-1,9 \cdot (\lg y + 3,88)} \right]^{1,8}} \right], \quad (3)$$

где $y = p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}$, МПа·м, может изменяться от 0,0001 до 0,3; $p_{\text{H}_2\text{O}}$, МПа, – от 0 до 0,1; $e = 2,7182818$.

Математические выражения получились громоздкими, однако, будучи введенными один раз в память вычислительного устройства, позволяют не только легко находить степень черноты газов, но и прогнозировать работу разных теплотехнических устройств и управлять их работой в режиме реального времени.

Чтобы определить степень черноты по этим формулам, необходимо знать температуру газа t , °С, его парциальное давление p и эффективную длину $S_{\text{эф}}$ пути луча, м. После вычисления $p S_{\text{эф}}$ данные подставляются в формулы (1), (2), и (3), после чего определяют $\varepsilon_{\text{CO}_2}$, $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$, β и $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \beta$, а потом – $\varepsilon_{\text{Г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$.

Анализ полученных данных показывает, что более 70% значений погрешностей по этим формулам не превосходят 1,5%, что для технических расчетов является вполне приемлемой величиной. Для оценки погрешности аналитического расчета степени черноты по уравнениям (1), (2) и (3) были проведены вычисления для различных значений температур и парциальных давлений газов. При обработке полученных данных было установлено, что погрешность вычислений по формулам (1), (2), (3) может быть описана экспоненциальным распределением вида

$$p(x) = A \exp \left(- \left| \frac{x}{\sigma} \right|^\alpha \right),$$

где $p(x)$ – функция плотности распределения вероятностей; A – нормирующий множитель распределения, α – показатель степени, характерный для данного распределения; σ – среднее квадратическое отклонение.

Для распределений погрешностей вычислений по формулам (1), (2), (3) были получены следующие показатели: для первого $\alpha = 1,34$ и $\sigma = 1,58$, для второго $\alpha = 1,07$ и $\sigma = 1,8$, для третьего $\alpha = 1,17$ и $\sigma = 0,75$.

Округляя полученные данные, описываем распределения погрешностей вычислений по

выражению (1) экспоненциальной кривой $p(x) = 95e^{-\frac{|x|}{1,6}}^{1,3}$,

а по формулам (2), (3) – $p(x) = 160e^{-\frac{|x|}{1,8}}$ и $p(x) = 22e^{-\frac{|x|}{0,75}}$,

где $e = 2,7182818$.

Таким образом, подсчитанное среднее квадратическое отклонение составило для первого распределения $\sigma = 1,6\%$, для второго $\sigma = 1,8\%$ и для третьего $\sigma = 0,75\%$.

В работе [4] было показано, что среди различных произвольно назначаемых значений доверительной вероятности есть одно значение, обладающее уникальным свойством. Интегральные кривые для широкого класса симметричных распределений (равномерного, треугольного, трапецеидального, нормального, экспоненциальных с $\alpha \geq 2/3$) в области 0,05-й и 0,95 квантилей пересекаются между собой в очень узком интервале значений $x/\sigma = 1,6 \pm 0,05$.

Отмеченное уникальное свойство доверительной вероятности $P_d = 0,9$ позволяет резко упростить расчетное суммирование погрешностей. Так, если суммируемые составляющие по-

грешности заданы своими значениями $\Delta_{0,9i}$, ($i = 1, 2, \dots$), то $\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$, где n – число сум-

мируемых составляющих. Для первого распределения $\Delta_{0,9i=1} = 1,6 \cdot 1,6 = 2,56\%$; для второго $\Delta_{0,9i=2} = 1,6 \cdot 1,8 = 2,88\%$ и для третьего $\Delta_{0,9i=3} = 1,6 \cdot 0,75 = 1,2\%$.

Для практических расчетов более важным является не величина каждой погрешности в отдельности, а значение погрешности степени черноты газа ε_Γ , для нахождения которой необходимо произвести суммирование указанных отдельных погрешностей. Поскольку величины ε'_{H_2O} и β перемножаются, то их суммарная относительная погрешность будет равна сумме их относительных погрешностей $\Delta_{0,9\Sigma}^{\varepsilon_{H_2O}} = 2,88 + 1,2 = 4,08\%$.

Окончательно суммарная погрешность для степени черноты газа составит

$$\Delta_{0,9\Sigma}^{\varepsilon_\Gamma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{0,9}^2} = \sqrt{2,56^2 + 4,08^2} = 4,8 \approx 5\%.$$

Таким образом, с доверительной вероятностью $P_d = 0,9$ погрешность вычисления степени черноты продуктов сгорания ε_Γ , не будет превосходить 5%.

Коэффициент теплоотдачи излучением может быть найден по известной формуле

$$\alpha_\Gamma = \frac{\varepsilon_\Gamma C}{T_\Gamma - T_w} \left[\left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] = 10^{-2} \varepsilon_\Gamma C \left(\frac{T_\Gamma}{100} + \frac{T_w}{100} \right) \left[\left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^2 + \left(\frac{T_w}{100} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где α_Γ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К); $C = \sigma \cdot 10^8 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент лучеиспускания; σ – постоянная излучения, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_Γ, T_w –

соответственно абсолютная температура излучаемого газа и стенки теплообменника (рекуператора), К.

При графоаналитических расчетах температурой стенки или задаются или определяют ее по номограмме, что не совсем удобно. Для исключения субъективной оценки температуры стенки и применения номограммы у металлических теплообменников коэффициент $\alpha_{\text{л}}$ можно найти следующим образом.

Через единицу поверхности теплообменника, имеющего с одной стороны температуру дымовых газов $t_{\text{Г}}$, а с другой – температуру нагреваемого воздуха $t_{\text{В}}$ ($^{\circ}\text{C}$), будет передаваться следующий тепловой поток

$$q = K(t_{\text{Г}} - t_{\text{В}}),$$

где q – поток тепла через единицу поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$; K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Это же самое можно получить, используя коэффициенты теплоотдачи на обеих сторонах теплообменной поверхности

$$q = \alpha_{\text{Г}}(t_{\text{Г}} - t'_{\text{w}}), \quad (5)$$

$$q = \alpha_{\text{В}}(t''_{\text{w}} - t_{\text{В}}), \quad (6)$$

где t'_{w} , t''_{w} – соответственно температура стенки теплообменника со стороны дымовых газов и нагреваемого пара, $^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\text{Г}}$, $\alpha_{\text{В}}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи на газовой и воздушной стороне рекуператора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Поскольку в металлических теплообменниках падение температуры в стенке составляет очень небольшую величину (порядка нескольких градусов), то тепловым сопротивлением стенки можно пренебречь и считать $t'_{\text{w}} = t''_{\text{w}} = t_{\text{w}}$. Тогда, приравнявая правые части уравнений (5), (6), получим

$$t_{\text{w}} = \frac{\alpha_{\text{Г}} t_{\text{Г}} + \alpha_{\text{В}} t_{\text{В}}}{\alpha_{\text{Г}} + \alpha_{\text{В}}}. \quad (7)$$

Для вычисления коэффициента теплоотдачи излучением примем более простую зависимость температуры стенки от температур дымовых газов и воздуха

$$t_{\text{w}} = \frac{t_{\text{Г}} - t_{\text{В}}}{\ln(t_{\text{Г}}/t_{\text{В}})}. \quad (8)$$

С учетом выражения (8) и некоторых преобразований формула (4) получит окончательный вид

$$\alpha_{\text{л}} = 10^{-8} \varepsilon_{\text{Г}} C \left(T_{\text{Г}} + \frac{t_{\text{Г}} - t_{\text{В}}}{\ln(t_{\text{Г}}/t_{\text{В}})} + 273 \right) \left[T_{\text{Г}}^2 + \left(\frac{t_{\text{Г}} - t_{\text{В}}}{\ln(t_{\text{Г}}/t_{\text{В}})} + 273 \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Тепловой расчет конвективной части рекуператора

Наиболее трудным в расчете рекуператора является определение коэффициента теплопередачи k , который в общем случае определяется



$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}},$$

где α_d – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке рекуператора, Вт/(м²·К); α_b – коэффициент теплоотдачи от стенки рекуператора к нагреваемому воздуху (газу), Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности стенки рекуператора, Вт/(м·К); l – толщина стенки рекуператора, м.

При практических расчетах металлических рекуператоров значением отношения l/λ можно пренебречь в виду его малости, поэтому можно записать

$$k = \frac{\alpha_d \alpha_b}{\alpha_d + \alpha_b}. \tag{10}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется в основном условиями движения и физическими свойствами газа и изменяется в зависимости от режима движения газа (ламинарный, турбулентный или переходный). При эксплуатации рекуператоров наиболее часто встречается установившееся турбулентное движение потока, характеризующееся числом Рейнольдса, превышающим 10000 ($Re \geq 10000$), поэтому для этого случая коэффициент теплоотдачи α может быть определен по формуле [1]

$$\alpha = f \frac{(v_t \rho_t d)^{0,8}}{d}, \tag{11}$$

где v_t и ρ_t – фактическая скорость (м/с) и плотность (кг/м³) движущегося газа, при данной температуре; d – приведенный диаметр канала, по которому движется газ, м; f – поправочный множитель.

Для аналитического описания физических параметров дымовых газов и воздуха автором были разработаны следующие формулы.

Поправочный множитель f для $0 \leq t \leq 1200$ для случаев:

$$\text{охлаждения дымовых газов } f = -6 \cdot 10^{-5} t^{1,5} + 4,25 \cdot 10^{-3} t + 3,252; \tag{12}$$

$$\text{охлаждения воздуха } f = -1 \cdot 10^{-7} t^{2,21} + 0,0019t + 3,222; \tag{13}$$

$$\text{нагрева дымовых газов } f = -6 \cdot 10^{-7} t^2 + 0,00235t + 2,52; \tag{14}$$

$$\text{нагрева воздуха } f = -4 \cdot 10^{-7} t^2 + 0,00154t + 2,438. \tag{15}$$

Средняя теплоемкость газов для $0 \leq t \leq 1400$:

$$\text{сухого воздуха } c_p^{CB} = 1,24 \cdot 10^{-4} t + \frac{4,186}{(t+100)^{1,2}} + 1,285 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}; \tag{16}$$

$$\text{влажного воздуха } c_p^{BB} = 1,319 \cdot 10^{-4} t + \frac{4,186}{(t+110)^{1,2}} + 1,3023 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}; \tag{17}$$

$$\text{дымовых газов } c_p^D = 1,339 \cdot 10^{-4} t + \frac{4,186}{(t+110)^{1,2}} + 1,497 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}}. \tag{18}$$

В диапазоне температур $0 \leq t \leq 1400$ коэффициент ν_b кинематической вязкости:

$$\text{воздуха } \nu_b = 10^{-6} \cdot (5,909 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,105t + 12,21), \text{ м}^2/\text{с}. \tag{19}$$

$$\text{дымовых газов } v_d = 10^{-6} \cdot (2,75 \cdot 10^{-5} t^{2,11} + 0,105t + 10,21), \text{ м}^2/\text{с}, \quad (20)$$

где t – температура газов, °С.

Для определения температуры дымовых газов, выходящих из рекуператора, примем за $q_d = \frac{\Delta Q_B}{V_d}$ среднее количество теплоты, которое в рекуператоре отдается 1 м³ дымовых газов, и с учетом выражения (18) запишем

$$1,339 \cdot 10^{-4} (t'_d)^2 + \frac{4,186 t'_d}{(t'_d + 110)^{1,2}} + 1,497 t'_d - q_d = 1,339 \cdot 10^{-4} (t''_d)^2 + \frac{4,186 t''_d}{(t''_d + 110)^{1,2}} + 1,497 t''_d,$$

где t'_d и t''_d , соответственно, температура дымовых газов на входе и выходе рекуператора. Это уравнение можно решить методом дихотомии и получить значение t''_{dx} . Однако с достаточной для практических целей точностью данное уравнение автор описал более простым математическим выражением

$$1,378 \cdot 10^{-4} (t'_d)^2 + 1,402 t'_d - q_d = 1,378 \cdot 10^{-4} (t''_d)^2 + 1,402 t''_d.$$

Поделив обе части уравнения на $1,378 \cdot 10^{-4}$, получим

$$(t'_d)^2 + 10174 t'_d - 7257 q_d = (t''_d)^2 + 10174 t''_d. \quad (21)$$

После этого найдем корень данного квадратного уравнения, учитывая, что левая часть уравнения, которую обозначим буквой c , всегда положительна, точно также, как и температура t'_{dx} . Тогда

$$t''_d = 0,5 \sqrt{1,0351 \cdot 10^8 + 4c} - 5087, \quad (22)$$

где c – величина левой части уравнения.

Уравнения (21), (22) позволяют строго математически вычислять t''_{dx} без какого-либо волевого или интуитивного назначения величины температуры, выходящих из рекуператора газов.

Заключение

1. С доверительной вероятностью $P_d = 0,9$ погрешность аналитического вычисления степени черноты продуктов сгорания ϵ_r , по формулам (1), (2), (3) не превосходит 5%.
2. Выражение (9) упрощает нахождение коэффициента теплоотдачи газов излучением в теплотехнических устройствах, имеющих теплопередающие поверхности с коэффициентом теплопроводности 45 – 50 Вт/(м²К) и выше.
3. Посредством формул (13) – (20) описываются физические параметры газов с погрешностью, не превосходящей 1%.
4. Уравнения (21), (22) дают возможность определить температуру выходящих из рекуператора газов
5. Разработанные математические модели позволяют аналитическим путем (без каких-либо номограмм, таблиц и графиков) с достаточной для практических расчетов точностью определять коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи в рекуператорах.
6. Компьютеризация расчетов облегчает проектную работу и сокращает ее сроки, а также позволяет свести весь расчет к формализованным процедурам. Кроме того, это дает возможность проводить моделирование работы различных теплотехнических устройств в

зависимости от изменяющихся параметров процессов горения и теплопередачи, определять их конструктивные параметры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. Москва: Metallurgizdat, 1958. 404 с.
2. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Термодинамика и теплоперенос. Москва: Metallurgiya, 1995, 400 с.
3. Гапоненко Ю.И. Основы металлургической теплотехники. Методическое руководство по изучению дисциплины и выполнению домашних контрольных работ. Жлобин: Жлобинский государственный металлургический колледж, 2011.
4. Новицкий П.В. Об особых свойствах 95%-ной квантили большого класса распределений и предпочтительных значениях доверительной вероятности при указании погрешностей приборов и измерений // Метрология. 1979. №2. С 18-24.
5. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата /В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова и др. Иваново: Изд-во ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2014. 124 с.

REFERENCES

1. Teben'kov B.P. *Rekuperatory dlya promyshlennyh pechej*. [Recuperators for industrial furnaces]. Moskva: Metallurgizdat, 1958. 404 p.
2. Telegin A.S., Shvydkij V.S., Yaroshenko Yu.G. *Termodinamika i teplomassoperenos* [Thermodynamics and heat and mass transfer]. Moskva: Metallurgiya, 1995, 400 p.
3. Gaponenko Yu.I. *Osnovy metallurgicheskoy teplotekhniki. Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu discipliny i vypolneniyu domashnih kontrol'nyh rabot* [Fundamentals of metallurgical heat engineering. Methodical guide to the study of discipline and the performance of home control work]. Zhlobin: Zhlobinskij gosudarstvennyj metallurgicheskij kolledzh, 2011.
4. Novickij P.V. *Ob osobyh svojstvah 95%-noj kvantili bol'shogo klassa raspredelenij i predpochtitel'nyh znacheniyah doveritel'noj veroyatnosti pri ukazanii pogreshnostej priborov i izmerenij* [On the special properties of the 95% quantile of a large class of distributions and the preferred values of confidence probability when indicating errors of instruments and measurements]. *Metrologiya*. 1979. No. 2, pp 18-24.
5. *Teplovoj raschet rekuperativnogo teploobmennogo apparata* [Thermal calculation of a regenerative heat exchanger]. V.V. Buhmirov, D.V. Rakutina, Yu.S. Solnyshkova i dr. Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina, 2014. 124 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Оленев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: olenevea@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olenev Evgeny Alexandrovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, (600000, Russia, Vladimir, 87 Gorky Street, e-mail: olenevea@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 25.03.2023; одобрена после рецензирования 20.04.2023, принята к публикации 07.05.2023.

The article was submitted 25.03.2023; approved after reviewing 20.04.2023; accepted for publication 07.05.2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приведем примеры вычисления степени черноты газа по разработанным формулам.

Воспользуемся примером из книги [1]. Рассчитать радиационный рекуператор, работающий в системе комбинированного радиационно-конвективного рекуператора. Температура воздуха, входящего в рекуператор из конвективного рекуператора, $t'_в = 420$ °С. Температура воздуха, выходящего из рекуператора (заданная температура нагрева) $t''_в = 600$ °С. Температура дымовых газов, входящих в рекуператор $t'_д = 1050$ °С. Количество подогреваемого воздуха $V_в = 2500$ нм³/ч. Количество дымовых газов $V_д = 2900$ нм³/ч. Приведенный диаметр воздушного кольцевого канала для прохождения воздуха $d_в = 0,0337$ м, а для канала дымовых газов – $d_д = 1,1$ м. Действительные скорости в рекуператоре: воздуха $v_в = 10,6$ и дымовых газов $v_д = 0,85$ нм/с. В дымовых газах содержится 19% CO₂ и 1% H₂O, причем для углекислоты и водяных паров соответственно $p_{CO_2} S_{эф} = 0,19$ ат·м (18,639 кПа·м) и $p_{H_2O} S_{эф} = 0,01$ ат·м (0,981 кПа·м).

Используя выражение (16) найдем теплоемкость воздуха перед рекуператором

$$c'_в = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 420 + \frac{4,186}{(420+100)^{1,2}} + 1,285 = 1,341 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} = 0,32 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \left\{ 0,319 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right\}.$$

Примечание: здесь и далее для сравнения результатов в фигурных скобках указываются величины, полученные в примере книги [1] при расчете рекуператора с использованием номограмм, таблиц и графиков.

Вычисляем энтальпию воздуха перед рекуператором

$$H'_в = V_в c'_в t'_в = 2500 \cdot 1,341 \cdot 420 = 1408050 \text{ кДж/ч.}$$

Далее аналогично находим теплоемкость воздуха после рекуператора

$$\begin{aligned} c''_в &= 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 600 + \frac{4,186}{(600+100)^{1,2}} + 1,285 = 1,359 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \\ &= 0,324 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \left\{ 0,324 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right\} \end{aligned}$$

и его энтальпию

$$H''_в = 2500 \cdot 1,359 \cdot 600 = 2038500 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, получаемое воздухом в радиационном рекуператоре,

$$Q_в = H''_в - H'_в = 2038500 - 1408050 = 630450 \text{ кДж/ч.}$$

Согласно уравнению (18) теплоемкость дымовых газов при входе в рекуператор

$$c'_д = 1,339 \cdot 10^{-4} \cdot 1050 + \frac{4,186}{(1050+110)^{1,2}} + 1,497 = 1,549 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} =$$

$$0,370 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \left\{ 0,370 \frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right\},$$

а их энтальпия $H'_д = 2900 \cdot 1,549 \cdot 1050 = 4720000$ кДж/ч.

Потери теплоты воздуха через стенки рекуператора, от полученной в нем теплоты, принимаем (как и в примере [1]) равными 15%, поэтому дымовые газы должны отдать (а воздух получить) теплоты в количестве, равном

$$\Delta Q_в = \frac{630450}{0,85} = 741000 \text{ кДж/ч.}$$

Энтальпия дымовых газов при выходе из рекуператора будет равна

$$H''_д = 4720000 - 741000 = 3980000 \text{ кДж/ч.}$$

Далее, в указанном примере работы [1] без каких-либо объяснений (видимо, на основе опыта и интуиции) принимается теплоемкость выходящих из рекуператора дымовых газов $0,365 \text{ ккал/нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ($1,528 \text{ кДж/ нм}^3 \cdot ^\circ\text{C}$) и вычисляется соответствующая этой теплоемкости температура $t''_d = \frac{H''_d}{V_d c''_d} = \frac{953000}{2900 \cdot 0,365} = 900^\circ\text{C}$.

Для исключения такой субъективной оценки температуры воспользуемся выражениями (21), (22). Сначала по формуле (21) находим значение свободного члена c

$$c = (t'_d)^2 + 10174t'_d - 7257q_d = 1050^2 + 10174 \cdot 1050 - 7257 \cdot 255,5 = 9931037.$$

Используя выражение (22) вычисляем температуру дымовых газов на выходе рекуператора

$$t''_d = 0,5\sqrt{1,0351 \cdot 10^8 + 4 \cdot 9931037} - 5087 = 897^\circ\text{C}.$$

Принимаем в рекуператоре систему противотока, температура стенки в начале рекуператора равна $t_H = t'_d - t'_b = 1050 - 600 = 450$, а в его конце $t_K = t''_d - t'_b = 897 - 420 = 477^\circ\text{C}$.

Средняя логарифмическая разность температур составит по формуле (8)

$$t_{cp} = \frac{t_K - t_H}{\ln \frac{t_K}{t_H}} = \frac{477 - 450}{\ln \frac{477}{450}} = 463^\circ\text{C}.$$

Теперь определим коэффициент теплоотдачи на воздушной стороне.

Средняя температура воздуха в рекуператоре

$$t_B^{cp} = \frac{420 + 600}{2} = 510^\circ\text{C}.$$

Фактическая скорость воздуха в рекуператоре

$$v_{B(510)} = 10,6 \cdot \left(1 + \frac{510}{273}\right) = 30,5 \text{ м/с}.$$

По формуле (19) коэффициент кинематической вязкости составит

$$\nu_B = 10^{-6} \cdot (5,909 \cdot 10^{-5} \cdot (510)^2 + 0,105 \cdot (510) + 12,21) = 81,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$
$$\{81,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}\}.$$

$$\text{Число Рейнольдса } Re = \frac{v_{B(510)} d_B}{\nu_B} = \frac{30,5 \cdot 0,0337}{81,1 \cdot 10^{-6}} = 12674.$$

Коэффициент теплоотдачи на воздушной стороне вычисляем по формуле (11).

Плотность воздуха при температуре 510°C составит

$$\rho_{510} = \frac{1,293}{1 + \frac{510}{273}} = 0,45 \text{ кг/м}^3.$$

При нагревании воздуха поправочный коэффициент из выражения (15) $f = 3,12\{3,12\}$.

Коэффициент теплоотдачи с учетом того, что $1 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 1,163 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, будет равен

$$\alpha_B = 1,163 \cdot 3,12 \frac{(30,5 \cdot 0,45 \cdot 0,0337)^{0,8}}{0,0337} = 58,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{C}} = \left(50 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{C}}\right) \cdot \left\{50 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{C}}\right\}$$

Определим теперь коэффициент теплоотдачи на дымовой стороне

$$\alpha_B = \alpha_K + \alpha_L,$$

где α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К})$; α_L – коэффициент теплоотдачи излучением, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К})$.

Средняя температура дымовых газов в рекуператоре

$$t'_d = \frac{1050 + 897}{2} = 974^\circ\text{C}.$$

Фактическая скорость дымовых газов

$$v_{d(974)} = 0,85 \left(1 + \frac{974}{273}\right) = 3,9 \text{ м/с}.$$

По формуле (20) коэффициент кинематической вязкости составит



$$v_d = 10^{-6} \cdot (2,75 \cdot 10^{-5} \cdot (974)^{2,11} + 0,105(974) + 10,21) = 168,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$\{169 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}\}$$

Число Рейнольдса $Re = \frac{v_{в(974)} d_{в}}{v_{в}} = \frac{3,9 \cdot 1,1}{168,1 \cdot 10^{-6}} = 25520.$

Плотность дымовых газов при температуре 974 °С составит

$$\rho_{974} = \frac{1,34}{1 + \frac{974}{273}} = 0,293 \text{ кг/м}^3.$$

При охлаждении дымовых газов из выражения (12) поправочный коэффициент $f = 5,56\{5,5\}.$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией будет равен

$$\alpha_k = 5,56 \frac{(3,9 \cdot 0,293 \cdot 1,1)^{0,8}}{1,1} = 4,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}} = (3,8 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}}).$$

Коэффициент теплоотдачи дымовых газов лучеиспусканием определяем отдельно для верха и низа рекуператора. Степень черноты углекислого газа и водяных паров для $p_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}} = 0,19 \text{ ат} \cdot \text{м}, (18,639 \text{ кПа} \cdot \text{м})$ и $p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}} = 0,01 \text{ ат} \cdot \text{м} (0,981 \text{ кПа} \cdot \text{м})$ по формулам (1), (2),

(3) составит: $\epsilon_{\text{CO}_2} = 0,1219\{0,12\}; \quad \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0169\{0,017\}; \quad \beta = 1,01\{1,0\};$
 $\epsilon_r = 0,1219 + 0,0171 = 0,1371\{0,137\}.$ Относительная погрешность ϵ_r будет равна 0,07%.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем отдельно для низа и верха рекуператора по формуле (9), который для низа рекуператора (вход дымовых газов) составит

$$\alpha_{л} = 10^{-8} \cdot 0,1371 \cdot 5,67 \cdot \left(1323 + \frac{1050-600}{\ln(1050/600)} + 273\right) \left[1323^2 + \left(\frac{1050-600}{\ln(1050/600)} + 273\right)^2\right] =$$

$$7,77 \cdot 10^{-9} \cdot (2400) \cdot [2910523] = 54,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ или } 46,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}); \{45,9 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С})\}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением для верха рекуператора (выход дымовых газов)

$$\alpha_{л} = 10^{-8} \cdot 0,1371 \cdot 5,67 \cdot \left(1170 + \frac{897-420}{\ln(897/420)} + 273\right) \left[1170^2 + \left(\frac{897-420}{\ln(897/420)} + 273\right)^2\right] =$$

$$7,77 \cdot 10^{-9} \cdot (2072) [2181825] = 35,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ или } 30,2 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}); \{29,8 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С})\}.$$

Принимаем изменение коэффициента теплоотдачи излучением вдоль дымового тракта рекуператора по логарифмическому закону, тогда средний коэффициент теплоотдачи излучением будет равен

$$\alpha_{л}^{\text{ср}} = \frac{54,3 - 35,1}{\ln \frac{54,3}{35,1}} = 44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ или } 37,8 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}); \{37,2 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С})\}.$$

Учитывая излучение предрекуператорного пространства на дымовую поверхность, увеличиваем (также, как и в примере работы [1]) полученный средний коэффициент излучением на 25%, тогда окончательно $\alpha_{л} = 44 \cdot 1,25 = 55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$

Общий коэффициент теплоотдачи на дымовой стороне будет равен

$\alpha_d = \alpha_k + \alpha_{л} = 4,4 + 55 = 59,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$ а коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воздуху по формуле составит

$$k = \frac{1}{\frac{1}{58,1} + \frac{1}{59,4}} = 29,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ или } 25,3 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}); \{25,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С})\}.$$

Поверхность нагрева радиационного рекуператора должна иметь величину

$$A_n = \frac{741}{3600} \frac{10^6}{29,4 \cdot 463} = 15,12 \text{ м}^2 \{15,15 \text{ м}^2\}$$

Относительная погрешность площади A_n поверхности нагрева менее 0,2%.



Таким образом, погрешность вычисления по разработанным автором формулам не превосходит 1% по сравнению с результатами, полученными в работе [1] с использованием большего числа графиков, номограмм и таблиц.