АЛГОРИТМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ЭВМ

ALGORITHMIZATION OF CALCULATION OF HEATING SURFACES OF A BOILER UNIT ON A COMPUTER

УДК 669

Сигаев Кирилл Юрьевич, студент, Липецкий Государственный Технический Университет, Россия, г. Липецк

Sigaev Kirill Yurievich, sigaev.ky@yandex.ru

Аннотация

В статье приводится расчет поверхностей нагрева котельных агрегатов с учетом излучающей способности газового потока. Данный алгоритм приведен к универсальному виду. Также этот алгоритм позволяется рассчитывать коридорные и шахматные пучки труб. Этот алгоритм можно использовать для программирования расчета паровых котлов на электронно-вычислительной машине и для создания цифровых двойников котельных агрегатов. Формулы приведены из-за нормативного расчета котельных агрегатов, который является хорошо апробированным.

Annotation

The article presents the calculation of heating surfaces of boiler units taking into account the radiating capacity of the gas flow. This algorithm is given a universal form. This algorithm also allows you to calculate corridor and staggered bundles of pipes. This algorithm can be used to program the calculation of steam boilers on an electronic computer and to create digital duplicates of boiler units. The formulas are given because of the standard calculation of boiler units, which is well-tested.

Ключевые слова: котел, перегретый пар, пароперегреватель, экономайзер.

Keywords: boiler, superheated steam, superheater, economizer.

Методики по расчету поверхностей нагрева схожи. Поэтому предлагается разработать общий алгоритм для всех поверхностей.

После расчета каждой поверхности нагрева будем искать ошибку вычисления. Методика по определению погрешности вычисления описана в пункте 6 данной пояснительной записки.

Опишем формулы расчета и преобразуем их в функции, в скобках укажем аргументы функций. В дальнейшей будем использовать данные функции для упрощения описание методик.

Количество тепла, отданного газами основной и дополнительной поверхностям нагрева по тепловому балансу, кДж/кг:

$$\mathrm{Q_б}(H', H'', \Delta\alpha) = \varphi \cdot (\mathrm{H'} - \mathrm{H''} + \Delta\alpha \cdot \mathrm{H_{хв}})$$

Это количество тепла необходимо приравнять к тому количеству тепла, которое рабочей средой.

Рабочая среда получает не только тепло продуктов сгорания, но еще и излучение из топочной камеры. Данная формула справедлива для воды и пара.

$$\mathrm{Q_б}(\mathrm{h'}, \mathrm{h''}, \mathrm{Q_л}, D) = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{B}} \cdot (\mathrm{h''} - \mathrm{h'}) - \mathrm{Q_л}$$

Теплота, которую воспринимает воздух:

$$\mathrm{Q_{вп}}(\mathrm{H'_в}, \mathrm{H''_в}, \Delta\alpha_{вп}, \beta''_{вп}) = \left(\beta''_{вп} + \frac{\Delta\alpha_{вп}}{2}\right)(\mathrm{H''_в} - \mathrm{H'_в})$$

где $\beta''_{вп}$ - отношение количества воздуха за воздухоподогревателем к теоретически необходимому для горения

Для первой ступени ВЗП по ходу воздуха

$$\beta''_{вп} = \Delta\alpha_т + \Delta\alpha_{вп}$$

Для второй ступени ВЗП по ходу воздуха

$$\beta''_{вп} = \Delta\alpha_т$$

Объединим эти две формулы для расчета в зависимости от номера ступени. Это позволит универсализировать алгоритм расчета ВЗП.

$$\beta''_{вп}(i) = \begin{matrix} \Delta\alpha_т + \Delta\alpha_{вп}, & i = 1 \\ \Delta\alpha_т, & i = 2 \end{matrix}$$

По уравнению теплообмена, определяем теплоту, воспринятую поверхностью нагрева за счет конвекции и излучения, кДж/м^3

$$Q_т(k, \Delta t, H) = \frac{k \cdot H \cdot \Delta t}{B}$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м^{2}К;

Δt – температурный напор, °С;

H – площадь поверхности нагрева, м^2.

В гладкотрубных пучках площадь поверхности нагрева принимаем равной поверхности труб с наружной (газовой) стороны.

Для гладкотрубных экономайзеров и испарительных поверхностей тепловым сопротивлением со стороны рабочей среды пренебрегают.

Коэффициент теплопередачи для гладкотрубных экономайзеров и испарительных поверхностей, Вт/(м^2·К)

$$k(\alpha_1, \psi) = \psi \cdot \alpha_1$$

Коэффициент теплопередачи для конвективного пароперегревателя и для трубчатого воздухоподогревателя

$$k(\alpha_1, \alpha_2, \psi) = \psi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Коэффициент теплопередачи для ширмового пароперегревателя (гладкотрубного), получающего прямое излучение из топки

$$k(\alpha_1, \alpha_2, Q_л, Q) = \frac{\alpha_1}{1 + \left(1 + \frac{Q_л}{Q}\right) \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1}$$

Где ε – коэффициент загрязнения. При сжигании газа принимается $\varepsilon = 0{,}0015 \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$

Расчетная скорость среды, м/с

$$w_c(V_c, F) = \frac{V_c}{F}$$

где V_c – средний объемный расход среды, м^3/с;

F – площадь живого сечения, м^2.

Расход, м^3/с

-дымовых газов

$$V_c(V_{пс}, v_{ср}) = \frac{B \cdot V_{пс} \cdot (v_{ср} + 273)}{273}$$

где $v_{ср}$ – расчетная температура дымовых газов, определяется как средняя температура на входе и на выходе из поверхности нагрева, °С;

$$v_{ср}(v', v'') = \frac{v' + v''}{2}$$

-воздуха

$$V_c(t_{ср}, \beta''_{вп}) = \frac{B \cdot \left(\beta''_{вп} + \frac{\Delta\alpha_{вп}}{2}\right) \cdot V^0 \cdot (t_{ср} + 273)}{273}$$

где $t_{ср}$ – расчетная температура среды, определяется как средняя температура на входе и на выходе из поверхности, °С;

$$t_{ср}(t', t'') = \frac{t' + t''}{2}$$

-пара или воды

$$V_c(D, \rho) = \frac{D}{\rho}$$

Среднее давление среды, Па

$$p_{ср}(p', p'') = \frac{p' + p''}{2}$$

Средняя площадь живого сечения для прохода среды, м^2

-поперечное омывание

$$F = ab - z_1 \cdot l \cdot d$$

где a,b – размеры газохода в рассматриваемом сечении, м;

z_1 – число труб поперек движения газов;

d – диаметр труб, м;

l – средняя длина труб, м;

-продольное омывание при течении внутри труб

$$F = z \cdot \pi \cdot \frac{d_{вн}^2}{4}$$

где z – число параллельно включенных труб

$d_{вн}$ – внутренний диаметр

-продольное омывание при течении между трубами

$$F = ab - z \cdot \pi \cdot \frac{d_н^2}{4}$$

где $d_н$ – наружный диаметр, м;

Коэффициент теплоотдачи от газовой среды к стенке складывается из конвективной составляющей и лучистой, Вт/(м^2·К)

$$\alpha_1(\alpha_к, \alpha_л) = \xi(\alpha_к + \alpha_л)$$

где ξ – коэффициент использования поверхности.

В данном котельном агрегате для всех поверхностей принимаем $\xi = 1$

$\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией

$\alpha_л$ – коэффициент теплоотдачи излучением

Коэффициент теплоотдачи конвекцией зависит от типа омывания и типа пучка. Для ручного расчета котельного агрегата используют номограммы. С целью автоматизации расчета будем использовать уравнения.

-продольное омывание поверхности

$$\alpha_к^{прод}(\lambda, \nu, Pr, d, w) = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_к$$

где w – скорость течения среды, м/с;

d – диаметр труб, м;

C_t – поправка, вводимая для воздуха и газов при их нагревании.

При охлаждении газов или воздуха $C_t = 1$

C_l – поправка на изменение вязкости жидкости.

В поверхностях нагрева температуры воды высокая, поэтому вязкость практически не зависит от температура, принимаем $C_l = 1$

$C_к$ – поправка, вводимая при течении в кольцевых каналах $C_к = 1$

-поперечное обтекание коридорных пучков и ширм

$$\alpha_к^{поп_к}(C_s, C_z, \lambda, \nu, Pr, d, w) = 0{,}2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot Pr^{0{,}33} \cdot C_s \cdot C_z$$

где C_s – поправка на геометрическую компоновку пучка. Используем функцию с условиями

$$C_s(\sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} 1, \ \sigma_2 \geq 2 \ / \ \sigma_1 < 1{,}5 \\ \left(1 + (2\sigma_1 - 3)\left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^{-2} \end{cases}$$

Если $\sigma_2 < 2$ и $\sigma_1 > 3$, то принимаем $\sigma_1 = 3$

C_z – поправка на число труб по ходу газов. Аналогично используем условия

$$C_z(z_2) = \begin{cases} 0{,}91 + 0{,}0125 \cdot (z_2 - 2), z_2 < 10 \\ 1, z_2 \geq 10 \end{cases}$$

-поперечное обтекание шахматных пучков

$$\alpha_к^{поп_ш}(C_s, C_z, \lambda, \nu, Pr, d, w) = 0{,}36 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu}\right)^{0{,}6} \cdot Pr^{0{,}33} \cdot C_s \cdot C_z$$

где C_s – коэффициент, определяемый в зависимости от относительного поперечного шага σ_1 и значения φ

Средний относительный диагональный шаг труб

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_2^2}$$

$$\varphi = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1}$$

$$C_s(\sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} 0{,}95 \cdot \varphi^{0{,}1}, \ 0{,}1 \leq \varphi \leq 1{,}7 \\ 0{,}77 \cdot \varphi^{0{,}5}, \ 1{,}7 < \varphi \leq 4{,}5 \text{ и } \sigma_1 < 3 \\ 0{,}95 \cdot \varphi^{0{,}1}, \ 1{,}7 < \varphi \leq 4{,}5 \text{ и } \sigma_1 \geq 3 \end{cases}$$

C_z – поправка на число рядов труб по ходу газа

$$C_z(z_2) = \begin{cases} 3{,}12 \cdot z_2^{0{,}05} - 2{,}5, \ z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 \leq 3 \\ 4 \cdot z_2^{0{,}02} - 3{,}2, \ z_2 < 10 \text{ и } \sigma_1 > 3 \\ 1, \ z_2 \geq 10 \end{cases}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением для чистого газового потока

$$\alpha_л(a, v_{ср}, t_з) = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_з + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_з + 273}{v_{ср} + 273}\right)^{3{,}6}}{1 - \left(\frac{t_з + 273}{v_{ср} + 273}\right)}$$

где $a_з$ – степень черноты теплообменных поверхностей котлоагрегата, принимается равной $a_з$=0,8;

$t_з$ – температура загрязнений, при сжигании газообразного топлива, °С

для ВЗП

$$t_з(\mathrm{t_{ср}}, v_{ср}) = \frac{\mathrm{t_{ср}} + v_{ср}}{2}$$

для остальных поверхностей

$$t_з(\mathrm{t_{ср}}) = \mathrm{t_{ср}} + 25$$

a – степень черноты газового потока

$$\mathrm{a}(k_г, S) = 1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{k_г \cdot p \cdot S}}$$

где $k_г$ – коэффициент ослабления лучей трехатомными газами

$$\mathrm{k_г}(\mathrm{r_{H_2O}}, \mathrm{r_n}, \mathrm{S}, \mathrm{v_{ср}}) = \left(\frac{7{,}8 + 16 \cdot \mathrm{r_{H_2O}}}{3{,}16 \cdot \sqrt{\mathrm{p} \cdot \mathrm{r_n} \cdot \mathrm{S}}}\right) \cdot \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{\mathrm{v_{ср}}}{1000}\right) \cdot \mathrm{r_n}$$

S – эффективная толщина излучающего слоя, м

для ВЗП

$$\mathrm{S}(d) = 0{,}9 \cdot \mathrm{d}$$

для остальных поверхностей

$$\mathrm{S}(\sigma_1, \sigma_2, \mathrm{d}) = 0{,}9 \cdot \mathrm{d} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 1\right)$$

Температурный напор, °С

$$\Delta\mathrm{t}(t', t'', v', v'') = \frac{\Delta\mathrm{t_б} - \Delta\mathrm{t_м}}{\ln \frac{\Delta\mathrm{t_б}}{\Delta\mathrm{t_м}}}$$

где $\Delta t_б$ – разность температур между средами на том конце согласно графику, где она больше

$\Delta t_м$ – разность температур между средами на том конце согласно графику, где она меньше

Тепловосприятие от излучения из топки, кДж/кг

$$Q_л(\eta_в, H, B, q_л) = \frac{\beta * q_л * \eta_в * H}{B_р}$$

где $q_л$ – среднее тепловое напряжение топки, Вт/м^2

$\eta_{в}$– коэффициент неравномерности тепловосприятия по высоте топки [табл. 6.1 литературы 3]

H – лучевоспринимающая поверхность, м^2

Теплота, излучаемая из топки и ширм, на поверхность нагрева за ширмами, кДж/кг

$$Q_{л.вых}(Q_{л.вх}, а, \beta, H_{л\ вых}, T_{ср}, \varepsilon_n) = \frac{Q_{л.вх} \cdot (1-a) \cdot \varphi_{ш}}{\beta} + \frac{5{,}7 \cdot 10^{-11} H_{л\ вых} \cdot T_{ср}^4 \cdot \varepsilon_n \cdot a}{B_{р}},$$

Список источников

1. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод [Текст]: – Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с. с ил.
2. Липов Ю. М. Компоновка и тепловой расчет парового котла [Текст]: учебное пособие/Ю. М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с. с ил.
3. Шацких Ю. В. Тепловой расчет котельных агрегатов [Текст]: учебное пособие/Ю. В. Шацких. – Липецк: ЛГТУ, 2008. – 144 с.

Source list

1. Heat calculation of boilers. Normative method [Text]: - Saint Petersburg: NPO TSKTI, 1998. - 256 p. with Il.
2. Lipov Yu. M. Layout and thermal calculation of a steam boiler [Text]: textbook/Yu. m. Lipov, Yu. F. Samoylov, T. V. Vilensky. - Moscow: Energoatomizdat, 1988. - 208 p. with Il.
3. Shatskikh Yu. V. Thermal calculation of boiler units [Text]: textbook/Yu. V. Shatskikh. Lipetsk: LGTU, 2008, 144 p.