

АДАПТАЦИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ К ИНТЕРВАЛУ ТЕМПЕРАТУР 1000...2000 К

Е.В. Торопов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Точность расчетов теплообмена излучением от потока высокотемпературного газа, полученного при сжигании природных топлив, в значительной степени зависит от точности и представительности данных о теплофизических свойствах газов и величине радиационного теплового потока. На основе надежных экспериментальных данных разработаны зависимости, позволяющие производить расчеты степени черноты продуктов сгорания. Определена точность расчетного приближения экспериментальных данных в функции двух факторов – оптической плотности газа и его температуры. По уточненным экспериментальным данным проведена адаптация параметров в зависимости для расчета коэффициента ослабления и числа Бугера. Рассмотрен диапазон применения полученных результатов для зоны интенсивного горения и основного объема топки котельного агрегата, что дает возможность определить граничные условия для этих участков котельного агрегата. Для зоны интенсивного горения применима разработанная ранее математическая модель с трехкомпонентной схемой, позволяющая разделить влияние факельного континуума и топочных газов. Теплообмен в основном объеме топки описывается в рамках парадигмы теплообмена, которая позволяет учесть конфигурацию топки и эффективность теплоотдачи на экранные поверхности.

Ключевые слова: степень черноты, поток излучения, температура, углекислота, водяной пар, математические модели.

При разработке математических моделей сложных теплоэнергетических и теплотехнических систем, работающих при температурах 1000...2000 К, необходима адаптация разрозненных экспериментальных данных по излучению компонентов, входящих в различных пропорциях в состав продуктов сгорания. Аналогичные задачи встают при проектировании высокотемпературных агрегатов, при их испытании и моделировании с переходом на новый технологический и производственный уровень [1, 2]. Применение различных методик при расчете потоков собственного излучения приводит к разным результатам, что сказывается на реализации той или иной технологии, направленной на улучшение технико-экономических и экологических показателей. Повышение точности теплофизических расчетов по определению параметров теплообмена дает возможность улучшить диагностику и управляемость процессов переноса теплоты в теплоэнергетических агрегатах. Этими соображениями определяется актуальность поставленной задачи.

1. Постановка задачи, исходные данные, метод адаптации

Экспериментальные данные по плотности потока собственного излучения трехатомных компонентов продуктов сгорания различных топлив (ПС) E_{RO_2} и $E_{\text{H}_2\text{O}}$, Вт/м², в обработке проф. А.С. Телегина представлены в табличном виде для температуры ПС 800...1600 °С и оптической плотности среды от 0,04 до 1,5 в размерности

$0,01[\text{RO}_2^{\text{вн}}]_{s_{\text{эф}}}$ и $0,01[\text{H}_2\text{O}^{\text{вн}}]_{s_{\text{эф}}}$, где в квадратных скобках – процентное содержание соответствующих газов во влажных ПС [3]. С фиксацией атмосферного давления в топке 0,1 МПа и с переходом от процентов к объемной доле компонентов ПС можно ввести оптическую плотность в виде $l_p = 0,1r_{\text{RO}_2} \cdot s_{\text{эф}}$ и $l_p = 0,1r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot s_{\text{эф}}$, причем фактическая оптическая плотность изменяется в пределах $l_p = 0,004...0,15$ МПа·м; температурный фактор также преобразуется согласно зависимости $\theta = (t + 273)/100$. При формализации как табулированных [3], так и графических [4] данных далее применялся метод последовательного определения интерполяционных коэффициентов многочленов второго порядка Грегори – Ньютона.

2. Степень черноты углекислоты и водяного пара

В координатном пространстве $\varepsilon_{\text{CO}_2} = f(l_p, \theta)$

зависимость для степени черноты углекислоты, адаптированную к графическим зависимостям Х. Хоттеля [1, 4], можно представить в виде произведения трех функционалов:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = F_1(l_p, \theta) \cdot F_2(l_p, \theta) \cdot F_3(l_p, \theta), \quad (1)$$

где

$$F_1(l_p, \theta) = f_1(\theta) + F_4(l_p, \theta) + F_5(l_p, \theta), \quad (2)$$

$$f_1(\theta) = 23,01624824 - 2,06153174\theta + 0,048771548\theta^2, \quad (3)$$

$$F_4(l_p, \theta) = l_p \left(-598,3855576 + 58,35333722\theta - 1,472306287\theta^2 \right), \quad (4)$$

$$F_5(l_p, \theta) = l_p^2 \left(3031,557034 - 299,1083856\theta + 7,622520341\theta^2 \right), \quad (5)$$

$$F_2(l_p, \theta) = l^{m_1}, \quad (6)$$

где $m_1 = 0,97 - 0,01875 \theta$,

$$F_3(l_p, \theta) = \theta^{-n_1}, \quad (7)$$

где $n_1 = 0,004775 + 0,01892 l_p$.

Аналогичные зависимостям (1)–(7) для степени черноты водяных паров ε_{H_2O} получены расчетные формулы

$$\varepsilon_{H_2O} = F_1(l_p, \theta) \cdot F_2(l_p, \theta) \cdot F_3(l_p, \theta), \quad (8)$$

где

$$F_1(l_p, \theta) = F_4(l_p, \theta) \cdot F_5(l_p, \theta), \quad (9)$$

$$F_4(l_p, \theta) = \theta^{n_2}, \quad (10)$$

$$F_5(l_p, \theta) = l_p^{m_2}. \quad (11)$$

В выражениях (8)–(11) введены обозначения:

$$n_2 = 0,210867479 - 0,01843152\theta + 0,438195 \cdot 10^{-3} \theta^2 + \\ + l_p \left(11,65974412 - 0,749301405\theta + 0,01551899\theta^2 \right) + \\ + l_p^2 \left(-56,31783769 + 3,792132874\theta - 0,078891146\theta^2 \right), \quad (12)$$

$$m_2 = 0,210866252 + 11,65976569l_p - 56,3179325l_p^2 + \\ + \theta \left(0,018431352 + 0,7493304248l_p - 3,792145187l_p^2 \right) + \\ + \theta^2 \left(0,438189 \cdot 10^{-3} + 0,015519068l_p - 0,078891476l_p^2 \right). \quad (13)$$

$$F_2(l_p, \theta) = l_p^{a+b\theta+c\theta^2}, \quad (14)$$

где

$$a = 0,147605215 + 7,673860291l_p - 26,7065922l_p^2, \quad (15)$$

$$b = -0,012019835 - 0,310332303l_p + 0,993936103l_p^2, \quad (16)$$

$$c = 10^{-3} \left(0,269051 + 3,577562l_p - 7,730533l_p^2 \right). \quad (17)$$

$$F_3(l_p, \theta) = \theta^{\alpha+\beta l_p+\gamma l_p^2}, \quad (18)$$

где

$$\alpha = 10^{-3} \left(-0,853186 + 5,985027\theta - 0,26905\theta^2 \right), \quad (19)$$

$$\beta = 7,67385869 - 0,310332307\theta + 0,003577572\theta^2, \quad (20)$$

$$\gamma = -26,70658468 + 0,993936279\theta - 0,007730578\theta^2. \quad (21)$$

Расчет степени черноты CO_2 в рамках примера для $l_p = 0,04$ и $\theta = 13,73$ ($t = 1100$ °С) дает отклонение от данных Х. Хоттеля $\Delta = -0,12$ % при $\varepsilon_{CO_2} = 0,149$ и $E_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2} \cdot 5,67\theta^4 = 3 \cdot 10^4$ Вт/м². Аналогичный расчет степени черноты водяных паров для $l_p = 0,04$ и $\theta = 12,73$ ($t = 1000$ °С) приводит к отклонению от данных Х. Хоттеля $\Delta = -0,23$ % с учетом поправочного коэффициента на парциальное давление водяного пара $\beta = 1,15$ при $\varepsilon_{H_2O} = 0,191$ и $E_{H_2O} = 2,8 \cdot 10^4$ Вт/м².

3. Адаптация экспериментальных данных Д. Эдвардса

Д. Эдвардс [5] произвел экспериментальное определение степени черноты ряда газов, в том числе CO_2 и H_2O , что важно для продуктов сгорания органических топлив, применяемых в теплоэнергетике и промышленной теплотехнике; экспериментальная установка позволяла определять интегральную степень черноты.

Экспериментальная установка включала все необходимые приборы и оборудование, обеспечивающие требуемую точность измерения спектральной плотности радиационного потока. Результаты экспериментов представлены в виде графиков на поле логарифмических координат по абсциссе и ординате, что несколько затрудняет сравнительный анализ.

Результаты обработки данных Д. Эдвардса по степени черноты CO_2 с применением двухпараметрической схемы можно представить в виде суммы двух функционалов:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = F_1(l_p) - F_2(l_p) \cdot 10^{-3} T, \quad (22)$$

где

$$F_1(l_p) = 0,10604136 + 2,775092225l_p - 8,858008562l_p^2, \quad (23)$$

$$F_2(l_p) = 0,033272654 + 0,132336726l_p + 2,298471747l_p^2. \quad (24)$$

Аналогичные зависимости получены для степени черноты паров H_2O :

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = F_3(l_p) - F_4(l_p) \cdot 10^{-3} T, \quad (25)$$

где

$$F_3(l_p) = 0,083848783 + 9,220363569l_p - 45,64014769l_p^2, \quad (26)$$

$$F_4(l_p) = 0,037199683 + 0,7150948399l_p - 3,753951627l_p^2. \quad (27)$$

Данные по степени черноты CO_2 хорошо согласуются с данными Х. Хоттеля, отклонение не превышает +4,0 %, увеличиваясь к малым значе-

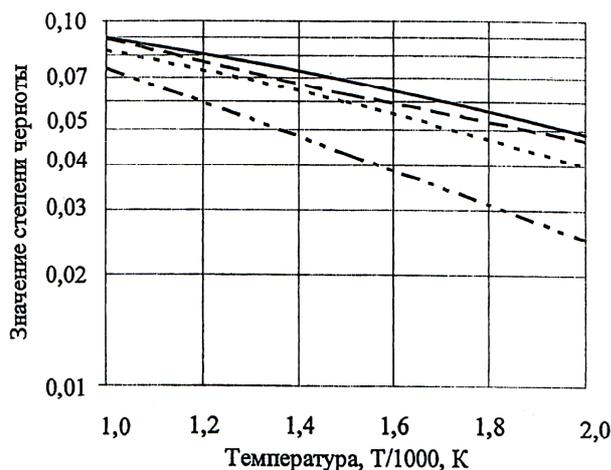


Рис. 1. Данные по степени черноты ε газообразных компонентов ПС при $l_p = 0,004$. Данные Д. Эдвардса: — для CO_2 ; - - для H_2O . Данные Х. Хоттеля: — — для CO_2 ; - - - - для H_2O

ниям l_p и к низким температурам $T \approx 1000$ К. Данные по степени черноты H_2O отличаются от данных Х. Хоттеля на величину, достигающую +40 %, увеличиваясь в области малых значений $l_p \approx 0,004$ МПа·м и высоких температур $T \approx 2000$ К, что в значительной степени объясняется погрешностью при экстраполяции опытных данных на двойной логарифмической сетке, а также отклонением излучения H_2O от закона Бера.

С учетом этих поправок расчет плотности потока собственного излучения CO_2 и H_2O можно производить по единой зависимости

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (28)$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/м²К⁴ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; при определении степени черноты смеси паров CO_2 и H_2O применяется зависимость

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (29)$$

На рис. 1, 2 изображены расчетные данные по степени черноты $\varepsilon_{\text{RO}_2}$ и $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ при общем давлении в топке 0,1 МПа для оптической плотности газообразных компонентов продуктов сгорания $l_p = 0,004; 0,08; 0,10; 0,15$ м·МПа. Расчеты произведены по экспериментальным данным Х. Хоттеля в соответствии с зависимостями (8)–(21) и Д. Эдвардса по зависимостям (22)–(27); при рассмотренной оптической плотности эффективная длина пути луча $s_{\text{эф}}$ изменялась для CO_2 от 0,3 до 11,6 м при среднем содержании $\text{CO}_2 = 13$ % и для H_2O от 0,36 до 13,63 м при среднем содержании $\text{H}_2\text{O} = 11$ %.

Необходимо также отметить ограничения при применении опытных данных Д. Эдвардса.

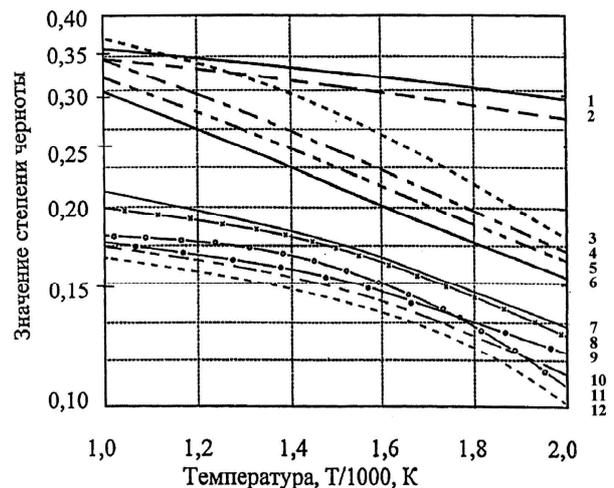


Рис. 2. Степень черноты ε газообразных компонентов ПС при $l_p = 0,08 \dots 0,15$. Данные Д. Эдвардса: 1 – $l_p = 0,15$ (H_2O); 2 – $l_p = 0,10$ (H_2O); 6 – $l_p = 0,08$ (H_2O); 8 – $l_p = 0,15$ (CO_2); 10 – $l_p = 0,10$ (CO_2); 11 – $l_p = 0,08$ (CO_2). Данные Х. Хоттеля: 3 – $l_p = 0,15$ (H_2O); 4 – $l_p = 0,10$ (H_2O); 5 – $l_p = 0,08$ (H_2O); 7 – $l_p = 0,15$ (CO_2); 9 – $l_p = 0,10$ (CO_2); 12 – $l_p = 0,08$ (CO_2)

Отклонение данных Д. Эдвардса от данных Х. Хоттеля при $T = 1000...2000$ К, %

Оптическая плотность l_p	$\Delta\varepsilon, \text{CO}_2, T = 1000 \text{ К}$	$\Delta\varepsilon, \text{H}_2\text{O}, T = 1000 \text{ К}$	$\Delta\varepsilon, \text{CO}_2, T = 1500 \text{ К}$	$\Delta\varepsilon, \text{H}_2\text{O}, T = 1500 \text{ К}$	$\Delta\varepsilon, \text{CO}_2, T = 2000 \text{ К}$	$\Delta\varepsilon, \text{H}_2\text{O}, T = 2000 \text{ К}$
0,004	+1,10	+10,84	+8,70	+28,00	+4,18	+37,50
0,080	+2,94	+4,76	+4,66	+4,82	+4,54	+5,95
0,100	+0,57	$\pm 0,00$	+4,57	+19,35	-12,38	+37,00
0,150	+7,14	-7,00	+2,89	+17,46	+3,84	+4,00

Оценки, произведенные с учетом закона действующих масс для константы равновесия диссоциации H_2O и соотношений (25)–(27), показали, что снижение $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ при диссоциации в условиях $T = 2000$ К может достигать 10 %. С понижением температуры снижение степени черноты интенсивно уменьшается до нуля при $T = 1200$ К. Эти выводы относятся к адиабатному режиму с последующей «закалкой» [6], что на практике трудно реализовать. Поэтому вышеприведенные оценки необходимо воспринимать как максимально возможные при определенном сочетании режимных факторов.

Реакция диссоциации CO_2 того же типа, что при диссоциации H_2O , но из-за различий в термодинамике процессов диссоциация CO_2 заметна уже при $T = 1300$ К, при 1700 К достигает 0,65 %, а при 2000 К – 1,75 %. Это могло бы приводить к снижению степени черноты на 16 %, но, в отличие от диссоциации H_2O , где оба продукта диссоциации диатермичны, в случае CO_2 оксид углерода CO имеет собственную степень черноты в исследуемом диапазоне 0,010...0,015, что на 90...95 % компенсирует эффект диссоциации CO_2 .

Фактические данные для сравнения результатов экспериментов Д. Эдвардса с результатами Х. Хоттеля в диапазоне оптической плотности $l_p = 0,004...0,150$ приведены в таблице.

Особенности экспериментов Д. Эдвардса и их обработки частично объясняют отклонение от данных Х. Хоттеля.

1. При аналитическом описании опытных данных Д. Эдвардса здесь применялся многочлен второй степени, причем полученные результаты имеют разброс, объясняемый погрешностями округления и усечения. С переходом к более высоким степеням многочленов достоверность математического описания несколько повысится, но степень уточнения при этом априорно неизвестна.

2. Зависимости (22)–(29) имеют экстремальный характер, значения ε^{ex} определяются обычным способом $\partial\varepsilon/\partial l_p = 0$, откуда $\varepsilon^{\text{ex}} = 0,5b/c$, где b – коэффициент при первой степени l_p , c – коэффициент при l_p^2 . Подставив конкретные значения из (22)–(27), получаем для $\varepsilon_{\text{CO}_2}^{\text{ex}} = 0,22$, для $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ex}} = 0,10$. Это означает, что при расчете степени черноты CO_2 и H_2O по данным Д. Эдвардса сначала наблюдается рост ε_i с увеличением l_p , затем снижение, но данные Х. Хоттеля этого не подтверждают.

3. Особенность данных Д. Эдвардса также в том, что эксперименты проводились на лабораторной установке с ограниченной возможностью изменения размеров рабочих элементов, в том числе размеров газового слоя. Практически все эксперименты проводились на спектрографе при постоянной толщине газового слоя 0,388 м при значениях l_p от 0,002 до 0,0388 МПа·м в области температур 300...1400 К. Поэтому требуемой достоверностью обладают те рекомендации, которые относятся к низким значениям l_p , при расчете промышленных топок и печей рационально применять данные Х. Хоттеля.

4. Адаптация зависимостей Гурвича – Митора

На основе номограмм Х. Хоттеля Гурвичем и Митром (Г–М) [7] были рассчитаны интегральные коэффициенты поглощения для смесей CO_2 и H_2O при значениях определяющих параметров, характерных для топок КА. Впоследствии эти зависимости вошли в нормативный метод расчета КА и справочную литературу [8, 9] при переходе к коэффициенту ослабления k , который учитывается в законе Бугера – Бера. По мере накопления теоретических и практических знаний о процессе первоначальный вид методики Г–М изменялся при сохранении структуры зависимости, в настоящее время зависимость Г–М имеет вид

$$k = \frac{0,8(1 + 20p_{\text{H}_2\text{O}})}{\sqrt{10p_n l}} \left(1 - \frac{0,38T_{\text{Г}}}{1000} \right) \quad (30)$$

с учетом закона Бугера – Бера

$$\varepsilon_{\text{Г}} = 1 - \exp(-10kp_n l). \quad (31)$$

Как показал численный анализ, зависимости (30) и (31) занижают расчетные величины $\varepsilon_{\text{Г}}$ по сравнению с экспериментальными данными Х. Хоттеля (1)–(11) на 24...28 % во всем диапазоне оптических характеристик продуктов сгорания среднего состава, причем влияние температурного фактора $(1 - 0,38 \cdot 10^{-3} T_{\text{Г}})$ на величину отклонения незначительно. Для адаптации численных коэффициентов зависимости (30) рационально ввести коэффициент адаптации $\xi_{\text{ад}} = k_{\text{H}}/k = k_{\text{H}}/k_1$, где k_{H} – коэффициент ослабления, определенный по данным Х. Хоттеля, а $k_1 = 0,8(1 + 20p_{\text{H}_2\text{O}})(10p_n l)^{-0,5}$.

При этом для получения достоверных данных рационально применить специальную методику, основанную на сопоставлении надежных данных по

степени черноты продуктов сгорания по (1)–(11), с ε_r , полученной по формулам (30)–(31).

Логарифмируя k_1 и подставляя ε_r^H согласно (1)–(11), получаем

$$k_1 = -\frac{\ln(1 - \varepsilon_r^H)}{10l_p(1 - 0,38 \cdot 10^{-3} T_r)}. \quad (32)$$

Коэффициент k_H определяется по выборке данных X. Хоттеля, характерных для топок котельных агрегатов и рабочих параметров промышленных печей для температуры 1273–1873 К, среднего состава продуктов сгорания $r_{\text{RO}_2} = 0,13$, $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11$, $P = 0,1$ МПа, $l = 0,8; 1,6; 3,2$ м; $l_p = (r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}})l_p$.

Полученные данные сопоставляются с расчетными, согласно формулы (32), с определением $\xi_{\text{ад}} = k_H/k_1$. По массиву $\xi_{\text{ад}}$ определяется среднее значение $\xi_{\text{ср}}$ и отклонение $\Delta\xi = \xi_{\text{ад}} - \xi_{\text{ср}}$; расчеты показали, что $\xi_{\text{ср}} = 1,40$, при этом $\Delta\xi \cdot 100\% / \xi_{\text{ср}}$ изменяется в пределах от $-6,6\%$ до $+7,0\%$. Таким образом, точность определения коэффициента ослабления продуктов сгорания по формулам (30)–(31), а значит и числа Бугера Bu , увеличивается в 4 раза при умножении k на 1,4.

5. Диапазон применения полученных результатов

Как показало настоящее исследование, чувствительность степени черноты продуктов сгорания ε_r к изменению температуры газовой смеси T_r и оптической плотности l_p различна: $\partial\varepsilon_r/\partial T_r = -0,21 \cdot 10^{-3}$, 1/К; $\partial\varepsilon_r/\partial l_p = 2,786$, 1/м·МПа. Это означает, что при снижении T_r в 1,25 раза ε_r и соответственно плотность потока собственного излучения газовой смеси E_r возрастают в 1,44 раза. При увеличении оптической плотности l_p в 1,25 раза ε_r и соответственно E_r возрастают в 1,56 раза. Здесь необходимо отметить, что поток результирующего излучения будет зависеть от конфигурации участка топки, степени черноты ограждения и его углового коэффициента [10].

Конкретное применение полученных результатов можно ожидать как при наладке теплового режима эксплуатируемых котлов и печей, так и при проектных расчетах этих установок.

Одной из наиболее важных проблем при достижении эффективной и надежной работы котлов является проблема определения адекватной тепловой схеме и свойствам применяемого топлива температуры в конце топки T_m'' . При сжигании газообразного топлива температура на выходе может достигать 1300...1350 °С ($T_m'' = 1573...1623$ К). Поэтому выбор этой температуры для газомазутных котлов – это технико-экономический вопрос, связанный с условиями надежной работы металла труб пароперегревателей, генерацией требуемого

количества пара в испарительных поверхностях для котлов с естественной циркуляцией, а также с достижимой температурой перегретого пара. В прямоточных котлах выбор температуры T_m'' также связан с ограничениями по степени нагрева пароводяной среды в экранных поверхностях топки [11].

Температура газов на выходе из топки T_m'' при сжигании твердого топлива выбирается из условий отсутствия шлакования и обеспечения надежной работы металла труб фестона и входных поверхностей пароперегревателя. Определяющими при выборе этой температуры являются шлакующие свойства топлива при учете аэродинамики потока газов, неравномерности температурного поля в выходном сечении топки и конструкции полурадиационных поверхностей нагрева [12].

При необходимости снижения T_m'' до приемлемого уровня рекомендуется конструктивно снижать уровень установки горелок или изменять угол наклона горелок от выхода из топки, при этом увеличивается значение параметра M , распределение температуры газов по высоте топки снижается при некотором увеличении их степени черноты. Ограничениями при применении этих рекомендаций являются опасность касания факела с поверхностью экранных труб и особенности конструкций горелок.

Ввод газов рециркуляции в нижнюю или верхнюю часть топки приводит к снижению температуры и увеличению степени черноты, так как состав топочных газов изменяется незначительно. Оба варианта ввода газов рециркуляции приводят к увеличению сопротивления котла по газовому тракту, увеличению расхода энергии на собственные нужды, снижению КПД и увеличению капитальных затрат. Нижняя подача рециркулята, кроме того, приводит к снижению тепловосприятости всей топки и снижению температуры в зоне интенсивного горения. Верхняя подача приводит к снижению температуры только в верхней части котла и увеличению сопротивления только конвективных поверхностей нагрева.

Рассмотренные выше факторы и параметры теплообмена в теплоэнергетических установках – степень черноты ПС, число Bu как безразмерный коэффициент ослабления и др. являются элементами единой системы управления процессами при совершенствовании конструкций и режимов в направлении повышения эффективности и снижения нагрузки на среду обитания. В совокупности с рекомендациями Нормативного метода [7] и новейшими исследованиями по генерации вредных выбросов [10] полученные результаты могут быть использованы для диагностики и управления процессами аэромеханики, теплообмена и горения в направлении оптимизации технико-экономических и экологических характеристик КА. Рационально

рассмотрение этих вопросов построить в соответствии с направлением движения ПС от плоскости подачи компонентов горения к выходному сечению КА.

Согласно теоретическим и опытным данным [10] процесс образования вредных веществ и формирование температурного уровня ПС в основном происходит в зоне интенсивного горения (ЗИГ) на расстоянии 3...5 калибров от среза горелок. Так на выход термических оксидов азота наибольшее влияние оказывает температура в ЗИГ, с повышением которой происходит экспоненциальный рост образования NO. Увеличение времени пребывания ПС в зоне горения также приводит к почти прямо пропорциональному росту эмиссии NO. Высота ЗИГ зависит от конструкции [10], температура на выходе ЗИГ пылеугольных котлов изменяется в пределах 1580...1980 К.

Таким образом, все основные термохимические процессы, приводящие к образованию вредных выбросов из КА, сосредоточены в ЗИГ и связаны с процессами подготовки и подачи компонентов горения. Поэтому определение температуры, степени черноты и оптической плотности газовой среды в этой зоне чрезвычайно важно с точки зрения диагностики и управления процессами теплообмена и генерации отдельных компонентов ПС. В основной работе по теме защиты среды обитания [10] с применением двухкомпонентной схемы устанавливается, что $T_{\text{ЗИГ}}$ изменяется от $T_{\text{ад}}$ до $T_{\text{ЗИГ}}''$ по мере тепловыделения и снижения температуры из-за недожога и теплоотдачи на поверхность ограждения зоны. Компоненты схемы – топочные газы ПС и ограждение зоны, адиабатной температуре $T_{\text{ад}}$ отвечает среда в начальном сечении ЗИГ, $T_{\text{ЗИГ}}''$ – выход ПС в основной объем топки после теплообмена с ограждением. Результат теплообмена с ограждением определяется коэффициентом эффективности экранной поверхности ограждения зоны ψ в соответствии с методикой нормативного метода [7].

Альтернативой является трехкомпонентная схема [13], в которой отдельно рассматриваются тепловые потоки от топочных газов, факельного континуума и ограждения ЗИГ. Это повышает достоверность диагностического анализа и способствует совершенствованию процесса управления реакциями горения топлива и образования составляющих ПС.

Поток топочных газов с полем концентраций, скорости и температуры входит в основной объем топки, где происходит догорание некоторых компонентов в потоке газов и перенос теплоты к рабочему телу. Для этого участка КА предложена парадигма теплообмена, которая основана на балансе потоков теплоты и массы [14] и описывает пространственно-временное распределение температур в топке КА с учетом условий однозначности и формы топки. Определение с помощью парадигмы

теплообмена температурного поля на выходе из топки может способствовать решению задач по защите поверхностей нагрева от шлакования, как отмечалось выше. В остальных поверхностях нагрева, расположенных в соединительном и конвективном газоходах, вопросы аэродинамики и теплообмена решаются аналогично рассмотренным задачам с учетом рекомендаций [7, 10].

Выводы

В результате проведенной аналитической работы с экспериментальными данными по степени черноты промышленных газов получены зависимости, которые позволяют использовать их в автоматизированных расчетах. В двухпараметрической схеме анализа за основу приняты экспериментальные данные Х. Хоттеля и Д. Эдвардса, произведен сравнительный анализ результатов расчетов по формулам, в основу которых положены данные этих экспериментов.

При высоких значениях оптической плотности газов $l_p > 0,01$ МПа·м степень черноты углекислоты выше таковой для водяных паров, при низких значениях $l_p < 0,01$ МПа·м преобладает излучение водяного пара. Определены погрешности метода и объяснены пределы допустимой экстраполяции в поле двух основных факторов – оптической плотности потока излучения и температуры газа.

Произведена адаптация зависимости Гурвича – Митора к экспериментальным данным Х. Хоттеля, предложена методика определения адаптационного коэффициента, определены и объяснены отклонения от экспериментальных данных. Определен диапазон применения полученных результатов при расчете температуры газов на выходе из ЗИГ и топки с применением математической модели теплообмена в ЗИГ и парадигмы теплообмена в основном объеме топки.

Литература

1. Телегин, А.С. *Тепломассоперенос* / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – 2-е изд. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
2. *Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса* / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 520 с.
3. *Теплотехнические расчеты металлургических печей* / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
4. Блох, А.А. *Теплообмен в топках паровых котлов* / А.А. Блох. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1984. – 240 с.
5. *Справочник по теплообменникам: в 2 т. / пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
6. *Математическая теория горения и взрыва* /

Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

7. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский, Э.С. Карасина. – Минск: ЭКОЛИТ, 2011. – 296 с.

8. Теплоэнергетика и теплотехника: справочник. Кн. 3: Тепловые и атомные электрические станции / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 647 с.

9. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия энергосбережения: справ. изд.: в 2 кн. / В.Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – Кн. 2. – 768 с.

10. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: учеб. для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 336 с.

11. Изюмов, М.А. Методология принятия

технических решений на стадии проектирования паровых котлов: учеб. пособие / М.А. Изюмов. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 108 с.

12. Богомолов, В.В. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск, УралВТИ, 2004. – 304 с.

13. Торопов, Е.В. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 19–25.

14. Торопов, Е.В. Математическая модель обобщенного теплообмена в топке котельного агрегата – парадигма теплообмена / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 5–12. DOI: 10.14529/power 170101

Торопов Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; evtor@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 июля 2018 г.

DOI: 10.14529/power180303

ADAPTATION OF COMBUSTION PRODUCTS EMISSIVITY FACTOR TO THE 1000...2000 K TEMPERATURE INTERVAL

E.V. Toropov, evtor@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The accuracy of calculations of heat transfer caused by the emission from a high-temperature gas flow during the combustion of natural fuels significantly depends on the accuracy and representation of data on thermal and physical properties of gases, as well as the value of a radiant heat flux. The reliable experimental data helped to generate the dependencies that allow performing calculations of emissivity factor for combustion products. The accuracy of the calculable approximation of experimental data in the two-factor function – optical density of the gas and its temperature – has been determined. The adaptation of parameters in a ratio for calculating the attenuation ratio and the Buger number has been carried out based on the updated experimental data. The range of application of the obtained results for the intense combustion zone as well as for the main combustion chamber volume of a boiler unit has been considered. This gives the possibility to determine boundary conditions for these zones of the boiler unit. Previously developed mathematical model with a triple-component pattern, which allows dividing the influence of flare continuum and combustion gases, is applicable for the intense combustion zone. The heat transfer in the main combustion chamber volume is described within the heat transfer paradigm, which allows accounting for the configuration of the combustion chamber as well as the efficiency of heat emission to the waterwall surfaces.

Keywords: emissivity factor, emission flux, temperature, carbon dioxide, water vapor, mathematical models.

References

1. Telegin A.S., Shvydky V.S., Jaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos*. [Heat and Mass Transfer]. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 455 p.

2. Shvydky V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. *Elementyi teorii sistem i chislennyye metodyi modelirovaniya protsessov teplomassoperenosa*. [Elements of the Theory of Systems and

- Numerical Methods of Modeling of Processes of Heat and Mass Transfer]. Moscow, Internet Engineering Publ., 1999. 520 p.
3. Zobnin B.F., Kazyaev M.D., Kitaev B.I., Lisienko V.G., Telegin A.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplotehniche-skie raschety metallurgicheskikh pechey*. [Thermal Calculations of Metallurgical Furnaces]. Moscow, Metallurgy, 1982. 360 p.
4. Bloch A.A. *Teploobmen v topkakh parovyih kotlov*. [Heat Exchange in Furnaces of Steam Boilers]. Leningrad, Energoatomizdat, 1984. 240 p.
5. *Spravochnik po teploobmennikam. Tom 1*. [Reference Book on Heat Exchangers. V. 1.]. Ed. Petukhov B.S., Shikova V.K. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 560 p.
6. Zeldovich, Y.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryiva*. [Mathematical Theory of Combustion and Explosion]. Moscow, Science, 1980. 478 p.
7. Kuznetsov N.V., Mitor V.V., Dubrovsky I.E., Karasina E.S. *Teplovoy raschet kotelnyih agregatov. Normativnyiy metod*. [Thermal Calculation of Boiler Units. Standard Method]. 2^d ed., reprint. Minsk, EKOLIT Publ., 2011. 296 p.
8. *Teploenergetika i teplotehnika. Kniga 3. Teplovyie i atomnyie elektricheskie stantsii: spravochnik*. [Heat Power Engineering and Heat Engineering. Book 3. Thermal and Nuclear Power plants. Handbook]. Ed. Klimenko A.V., Zorin V.M. Moscow, MPEI Publishing House Publ., 2007. 647 p.
9. Lisienko V.G. *Hrestomatiya energosberezheniya/ Spravochnoe izdanie*. [Anthology of Energy Saving. Reference Edition. Book 2]. Moscow, Heat Power Publ., 2003. 768 p.
10. Roslyakov P.V. *Metodyi zaschityi okruzhayushey sredy*. [Methods of Environmental Protection]. Moscow, MPEI Publishing House Publ., 2007. 336 p.
11. Izyumov M.A. *Metodologiya prinyatiya tehniceskikh resheniy na stadii proektirovaniya parovyih kotlov* [Methodology of Technical Decision-Making at the Design Stage of Steam Boilers]. Moscow, Publishing House MEI, 1999. 108 p.
12. Bogomolov V.V., Artemyev N.V., Alekhnovich A.N., Novitsky N.V., Timofeeva N.A. *Energeticheskie ugli vostochnoy chasti Rossii i Kazahstana. Spravochnik* [Power Coals of the Eastern Part of Russia and Kazakhstan. Handbook]. Chelyabinsk, UralVTI Publ., 2004. 304 p.
13. Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical Model of Heat Transfer into the Intensive Burning Zone of Steam Generator. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.). DOI: 10.14529/power 150403
14. Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical Model of Generalized Heat Transfer Inside Boiler Unit Furnace – Heat Exchange Paradigm. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 5–12. (in Russ.). DOI: 10.14529/power 170101

Received 27 July 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Торопов, Е.В. Адаптация степени черноты продуктов сгорания топлив к интервалу температур 1000...2000 К / Е.В. Торопов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 22–29. DOI: 10.14529/power180303

FOR CITATION

Toropov E.V. Adaptation of Combustion Products Emissivity Factor to the 1000...2000 K Temperature Interval. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 22–29. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180303