

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 133–137
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 133–137

Научная статья
УДК 535.233; 536.52; 662.66; 621.18
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-133-137

Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля

В.А. Кузьмин¹, И.А. Заграй^{1✉}, Н.А. Шмакова¹

¹ Вятский государственный университет, Киров, Россия
✉ zagravia@yandex.ru

Аннотация. Для условий факельного сжигания кузнецкого угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф выполнены расчеты спектральной излучательной способности топочных газов. Найдены теоретические зависимости излучательной способности от температуры для полосы поглощения CO₂ (4,24 мкм). На разных высотах топки котла проведена регистрация температуры топочных газов с помощью пирометра, воспринимающего излучение в полосе CO₂. Построены экспериментальные зависимости измеренных температур от установленной на пирометре излучательной способности в интервале 0,5–1. Точки пересечения экспериментальных и теоретических функций позволили определить температуры топочных газов, которые составили 1268, 1376 и 1156 К для высот 9, 14 и 16 м соответственно. Разработанная авторами программа «Temper» позволяет определять температуру топочных газов по полосе поглощения CO₂ в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (угля и торфа).

Ключевые слова: излучательная способность, спектральный пирометр, топочные газы, паровой котел, факельное сжигание угля

Для цитирования. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А. Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 133–137. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-133-137

Original article

Emissivity and temperature determining of the steam boiler furnace gases at coal flaring

V.A. Kuzmin¹, I.A. Zagrai^{1✉}, N.A. Shmakova¹

¹ Vyatka State University, Kirov, Russia
✉ zagravia@yandex.ru

Abstract. Computations of spectral emissivity of the furnace gases were performed for the conditions of the kuznetsk coal flaring in the furnace of the BKZ-210-140F steam boiler. Theoretical dependencies of the emissivity on the temperature for the CO₂ absorption band (4.24 μm) were found. Temperature registration of the furnace gases is performed at various heights of the boiler furnace with the pyrometer, perceiving emission in the CO₂ band. The experimental dependencies of measured temperatures on the emissivity set on the pyrometer within the interval of 0.5–1 were plotted. The “Temper” program developed by the authors allows determining temperature of the furnace gases by the CO₂ absorption band in the BKZ-210-140F steam boiler while solid fuels burning (coal and peat).

© Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А., 2023

Keywords: emissivity factor, spectral pyrometer, furnace gases, steam boiler, flame combustion of coal

For citation. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Shmakova N.A. Emissivity and temperature determining of the steam boiler furnace gases at coal flaring. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 133–137. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-133-137

Введение

В котельных агрегатах большой энергетики при производстве тепловой и электрической энергии часто используется факельное сжигание твердых топлив (угля и торфа). Повышение КПД паровых котлов достигается увеличением температуры топочных газов при сжигании топлива. Однако процесс повышения температуры приводит к увеличению выбросов оксидов азота, ухудшающих экологические показатели котлоагрегата [1, 2]. Вместе с тем высокая температура вызывает плавление минеральной части топлива, налипание частиц летучей золы на теплообменные поверхности и шлакование топки [3, 4], поэтому для организации надежной работы паровых котлов необходимо соблюдение оптимального температурного режима сжигания топлива. Для постоянного контроля и измерения температуры топочных газов наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения [5, 6]. Устанавливаемая на пирометре излучательная способность зависит от большого числа факторов [7, 8], поэтому должна быть предварительно определена.

Целью настоящей работы является пирометрическое определение температуры топочных газов по полосе поглощения CO₂ на основании расчетных данных по излучательной способности при факельном сжигании угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

Теоретическое определение излучательной способности топочных газов

В работе рассматривается факельное сжигание кузнецкого угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. При паропроизводительности котла 205 т/ч расход угля составляет 33,16 т/ч. Характеристики топлива (рабочее состояние): W^p = 12 %, A^p = 15 %, C^p = 57,1 %, O^p = 9,6 %, H^p = 4,1 %, N^p = 1,8 %, S^p = 0,4 %.

На основании состава топлива по методике работы [9] определялся состав топочных газов (в об.%): H₂O = 9,16, CO₂ = 14,07, SO₂ = 0,03,

N₂ = 73,49, O₂ = 3,25. С учетом массовой доли частиц золы $z = 0,015$ в продуктах сгорания массовые доли газовых компонентов составили: H₂O = 0,055, CO₂ = 0,207, SO₂ = $7,2 \cdot 10^{-4}$, N₂ = 0,688, O₂ = 0,035 [1].

Для условий факельного сжигания кузнецкого угля в топке парового котла проведены расчеты спектральных характеристик излучения (плотности потока и излучательной способности) топочных газов. Решение интегродифференциального уравнения переноса энергии излучения для излучающей, поглощающей и рассеивающей среды (газ и частицы золы) выполнено методом сферических гармоник в P₃-приближении по комплексной программе Spectr [7, 8].

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчета спектральной излучательной способности ϵ_λ топочных газов. На основании анализа селективного спектра излучения установлено, что наибольший практический интерес представляет полоса излучения молекулы CO₂, отличающаяся стабильно высокими значениями ϵ_λ . В табл. 1 представлены некоторые расчетные значения $\epsilon_{расч}$ в полосе CO₂ при изменении температуры.

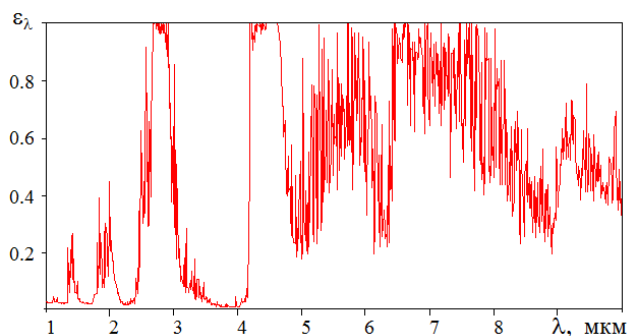


Рис. 1. Спектральная излучательная способность топочных газов при $T = 1273$ К

Таблица 1. Расчетные значения спектральной излучательной способности в полосе CO₂

T, К	873	1073	1273	1473	1673
$\epsilon_{расч}$	0,7975	0,9003	0,9504	0,9663	0,9708

Экспериментальное определение температуры

С помощью пирометра Optris CTlaser F2, воспринимающего излучение в полосе CO_2 ($\lambda = 4,24$ мкм), на разных высотах H топки котла (рис. 2) проведена регистрация температуры топочных газов в зависимости от установленной на пирометре излучательной способности.

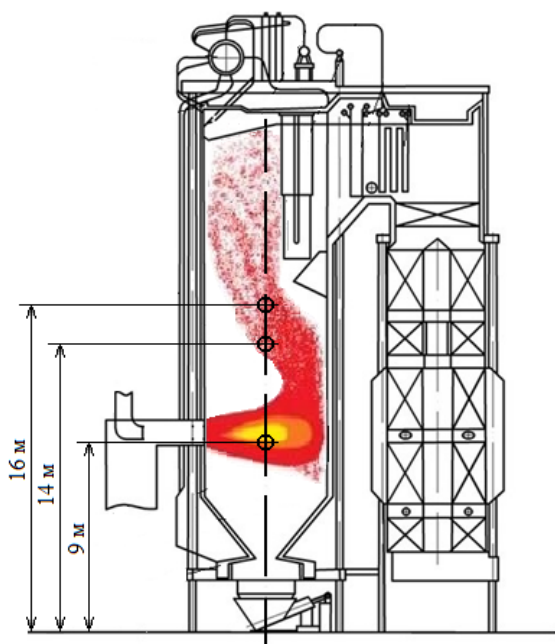


Рис. 2. Схема котла БКЗ-210-140Ф с расположением смотровых лючков

В течение времени $t = 6 \div 10$ с записывались массивы данных по температуре T с шагом $\Delta t = 1$ мс. На рис. 3 приведен пример серии экспериментальных данных с указанием средней температуры $T_{\text{ср}}$ и среднеквадратичного отклонения σ .

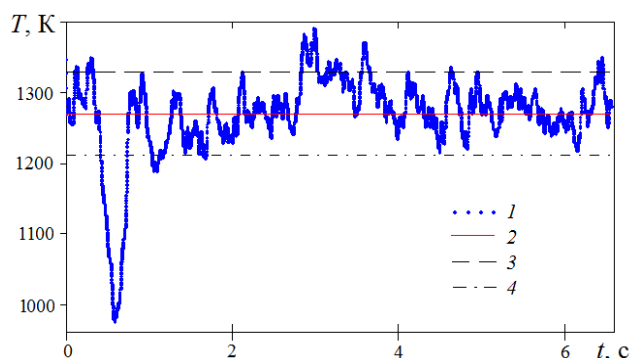


Рис. 3. Результаты измерения температуры топочных газов при $H = 9$ м и $\varepsilon = 0,9$: 1 – экспериментальные данные по температуре T ; 2 – $T_{\text{ср}}$; 3 – $T_{\text{ср}} + \sigma$; 4 – $T_{\text{ср}} - \sigma$

Пирометрическое определение температуры топочных газов проводилось на высотах котла $H = 9$ м (на уровне горелок), 14 м и 16 м при изменении излучательной способности в диапазоне $0,5 \div 1$.

На рис. 4 показаны экспериментальные результаты измерения средних температур, аналитические функции $T = f(\varepsilon)$ на основании этих данных, а также расчетная зависимость $\varepsilon_{\text{расч}} = f(T)$. Точки пересечения сплошных линий с пунктирной линией дают искомые температуры на соответствующих высотах котла. Так, температура топочных газов в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1268 К, в средней части ($H = 14$ м) – 1376 К, а в хвостовой части ($H = 16$ м) – 1156 К.

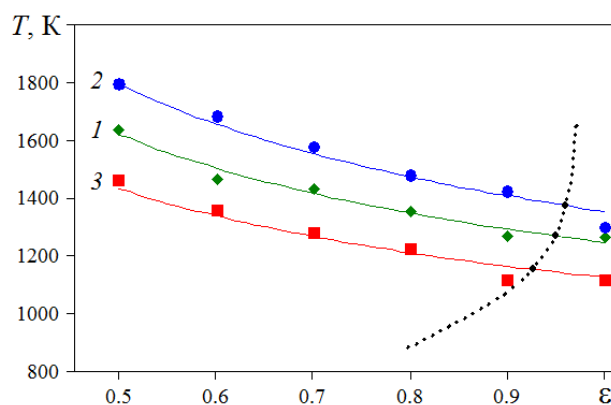


Рис. 4. Зависимости измеренной температуры от задаваемой на пирометре излучательной способности: 1 – $H = 9$ м; 2 – $H = 14$ м; 3 – $H = 16$ м. Сплошные линии – аналитические функции $T = f(\varepsilon)$. Пунктирная линия – расчетная зависимость $\varepsilon_{\text{расч}} = f(T)$

Программа для определения температуры топочных газов

Разработанная авторами программа Temper [10] с использованием пирометра Optris CTlaser F2, воспринимающего тепловое излучение в полосе поглощения CO_2 , позволяет определять температуру топочных газов при факельном сжигании твердых топлив (угля и торфа).

Экспериментальные значения температуры, регистрируемые пирометром в зависимости от устанавливаемой на нем излучательной способности, заносятся через кабель USB на ПК. Выполняется аппроксимация полученных данных функцией $T = f(\varepsilon)$. Далее программа использует расчетные зависимости $\varepsilon_{\text{расч}} = f(T)$ при разном массовом содержании CO_2 в интер-

вале $0,05 \div 0,35$ и проводит их интерполяцию сплайнами Акима. При заданной массовой доле CO_2 строятся экспериментальные и теоретические зависимости с указанием точек пересечения. Используя метод последовательных приближений определяются и выводятся на экран излучательные способности и температуры топочных газов для заданных высот.

Заключение

На основании анализа спектров излучения топочных газов при сжигании угля выбрана стратегия определения температуры с помощью пирометра Opttris CTlaser F2, воспринимающего излучение в полосе поглощения CO_2 (4,24 мкм). На разных высотах топки котла БКЗ-210-140Ф ($H = 9, 14, 16$ м) установлена зависимость измеренной температуры от заданной излучательной способности на пирометре, построены аналитические функции $T = f(\varepsilon)$. Расчетная зависимость $\varepsilon_{\text{расч}} = f(T)$ позволила определить температуру топочных газов, которая составила 1268, 1376 и 1156 К для корневой, средней и хвостовой части факела соответственно.

Созданная программа Tempreg входит в состав разрабатываемого программно-аппаратного комплекса по определению температуры продуктов сгорания в котлоагрегатах при сжигании твердых топлив

Список источников

1. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126–132. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132
2. Бабий В.И., Котлер В.Р., Вербовецкий Э.Х. Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах // Энергетик. 1996. № 6. С. 8–13.
3. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 2013. 112 с.
4. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 27–33. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33
5. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. Москва: Физматлит, 2012. 248 с.
6. Захаренко В.А., Пономарев Д.Б., Шкаев А.Г. Пирометрический контроль топочного пространства котлоагрегатов // Динамика систем, механизмов и машин.

2019. Т. 7. № 4. С. 207–212. DOI: 10.25206/2310-9793-7-4-207-212

7. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Десятков И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твердых топлив // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 2. С. 301–315. DOI: 10.1134/S0869864319020112
8. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 58–67.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского и др. 2-е изд., перераб. Москва: Эколит, 2011. 296 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Российская Федерация / Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А., Адеков А.Л. – № 2021667438. Tempreg: № 2021667015. Заявл. 29.10.2021, опублик. 29.10.2021. Бюл. № 11.

References

1. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Kontrol' obrazovaniya oksidov azota v topke parovogo kotla s tsel'yu zashchity atmosfernogo vozdukha ot zagryazneniya [Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution]. *Theoretical and Applied Ecology*, 2021, no. 3, pp. 126–132. (In Russ.). DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132
2. Babiy V.I., Kotler V.R., Verboveckij E.H. Mehanizm obrazovaniya i sposoby podavleniya oksidov azota v pyl'eugol'nykh kotlah // [Mechanism of formation and methods of suppression of nitrogen oxides in pulverized coal boilers]. *Energetik*, 1996, no. 6, pp. 8–13. (In Russ.)
3. Alekhovich A.N. Shlakovanie pyl'eugol'nykh energeticheskikh kotlov [Slagging in powder-coal power boilers. Moscow]. Moscow, NTF "Energoprogress", 2013, 112 p. (In Russ.)
4. Kuz'min V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Opredelenie plavkosti zoly torfa mestorozhdenii Kirovskoi oblasti [Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits]. *Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki*, 2018, no. 11–12, pp. 27–33. (In Russ.). DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33
5. Magunov A.N. Spektral'naya piroometriya. [Spectral Pyrometry]. Moscow, Fizmatlit, 2012, 248 p. (In Russ.)
6. Zakharenko V.A., Ponomarev D.B., Shkaev A.G. Pirometricheskii kontrol' topochnogo prostranstva kotloagregatov [Pyrometric control of furnace space of the boiler units of TPP]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 207–212. (In Russ.). DOI: 10.25206/2310-9793-7-4-207-212
7. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Maratkanova E.I., Desiatkov I.A., Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 281–294. (In Russ.)
8. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Rukavishnikova R.V. Teplovoe izluchenie geterogennykh produktov sgoraniya pri szhiganiu torfa [Thermal radiation of heterogeneous combustion products at peat burning]. *Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki*,

2015, no. 3–4, pp. 58–67. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0869864319020112

9. Teplovoi raschet kotel'nykh agregatov. Normativnyi metod [Thermal Calculations for Boilers. Standard Method]. By ed. N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubrovskii, E.S. Ka-

rasin et al. 2nd edition. Moscow, Ekolite, 2011, 295 p. (In Russ.)

10. **Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Shmakova N.A., Adekov A.L.** Software registration certificate no. 2021667438 of the Russian Federation. Temper. no. 2021667015 (2021).

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 09.03.2023.

The article was submitted on 14.11.2022; approved after reviewing on 27.02.2023; accepted for publication on 09.03.2023.