

Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения

© 2021. В. А. Кузьмин¹, д. т. н., профессор,
И. А. Заграй¹, к. т. н., доцент,
И. А. Десятков², главный энергетик,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, Московская, д. 36,
²АО «ВяткаТорф»,
610017, Россия, г. Киров, ул. Маклина, д. 31,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

В котельных агрегатах промышленной теплоэнергетики довольно часто используется факельное сжигание углей и, реже, торфа. Высокая температура продуктов сгорания, с одной стороны, является показателем эффективности работы котлов, но, с другой стороны, может вызывать высокий уровень образования оксидов азота, в значительной мере обуславливающих загрязнение атмосферного воздуха в районах размещения теплоэнергетических предприятий. Для поддержания определённого уровня образования оксидов азота необходимо поддерживать постоянным и стабильным уровень температуры продуктов сгорания. В данной работе для определения температуры предложена методика с использованием пирометра Optris с рабочей длиной волны 4,24 мкм в полосе поглощения CO₂. На разных высотах топки котла получены экспериментальные зависимости температуры продуктов сгорания от установленной на пирометре излучательной способности. Приведены результаты определения температуры продуктов сгорания в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля. Текущий контроль уровня температуры продуктов сгорания позволяет поддерживать образование оксидов азота на требуемом экологически безопасном уровне.

Ключевые слова: температура продуктов сгорания, оксиды азота, факельное сжигание угля или торфа, излучательная способность, пирометрия, паровой котёл.

Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution

© 2021. V. A. Kuzmin¹ ORCID: 0000-0001-9979-4610^{*}
I. A. Zagrai¹ ORCID: 0000-0002-8886-8677^{*}
I. A. Desiatkov² ORCID: 0000-0002-0532-2960^{*}
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²AO "VyatkaTorf",
31, Maklina St., Kirov, Russia, 610017,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

Flaring of coals and, less often, peat is often used in boilers of industrial heat power engineering. High temperature of combustion products can be an indicator of the efficiency of boilers. But it can cause a high level of nitrogen oxides formation posing a threat of air pollution. Therefore, it is necessary to maintain a constant and stable temperature level to keep a certain level of nitrogen oxides formation. This paper presents a method for determining the temperature of combustion products using an Optris pyrometer with an operating wavelength of 4.24 μm in the CO₂ absorption band. For the different heights of the boiler furnace, the experimental dependences of the temperature of combustion products on the emissivity set on the pyrometer are obtained. The results of determining the temperature of combustion products in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler during flaring of peat and coal are presented. Current control of the temperature level of combustion products allows to maintain the required environmentally safe level of nitrogen oxides formation.

Keywords: temperature of combustion products, nitrogen oxides, flaring of coal or peat, emissivity, pyrometry, steam boilers.

Основными источниками вредных выбросов в атмосферу являются продукты сгорания тепловых электрических станций (ТЭС), котельных и промышленных предприятий. При сжигании органических топлив в атмосферу с дымовыми газами котлов попадает большое количество вредных веществ: оксидов азота (NO , NO_2 , N_2O), оксидов серы (SO_2 , SO_3), оксидов углерода (CO и CO_2), твёрдых частиц золы и т. д. [1–3].

Самыми экологически опасными выбросами являются оксиды азота NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), которые образуются при горении топлива в результате химической реакции азота (содержащегося в топливе и воздухе) с кислородом. Выбросы оксидов азота (в основном состоящие из NO) в атмосферу негативно воздействуют на здоровье людей, раздражая дыхательные пути и увеличивая тем самым количество острых и хронических респираторных заболеваний. Оксиды азота NO_2 (вместе с оксидами серы), соединяясь с атмосферной влагой, образуют «кислотные дожди», которые негативно влияют на растительный и животный мир, вызывают разрушение материалов и конструкций, и как следствие, приводят к серьёзным экономическим последствиям [3, 4].

При сжигании всех видов твёрдого топлива доля топливных NO велика и может составлять до 100% общего выброса NO_x . Образование топливных оксидов азота происходит при небольших температурах при выходе летучих веществ из топлива (торфа, угля). Низкого выхода NO_x можно достичь при сжигании обеднённых смесей с высоким коэффициентом избытка воздуха α . При увеличении α температура пламени снижается и образование оксидов азота уменьшается. При этом уменьшается скорость превращения CO в CO_2 . Предельное значение концентрации угарного газа определяет верхнюю границу для величины α , и, соответственно, минимально возможную температуру пламени [5].

Зависимость концентрации топливных оксидов азота NO_x от температуры продуктов сгорания и времени пребывания их в топке представлены на рисунке 1 (см. цв. вкладку VI). [6]. Чем выше температура, тем быстрее происходит образование топливных NO_x . Из графиков следует, что при низких температурах выполняется условие высокой экологической безопасности (низкие значения концентрации оксидов азота), однако это снижает эффективность работы котлов. Температурный уровень оказывает влияние на максимальную концентрацию NO_x только при невысоких температурах. При значениях температуры более 1570 К

конечная концентрация NO_x становится примерно одинаковой (900 мг/м^3).

С повышением температуры продуктов сгорания повышается КПД котла, но ухудшаются экологические показатели. Согласно директиве ЕС [7], с 2016 г. для действующих котельных установок тепловой мощностью более 100 МВт предельные выбросы NO_x ограничены 200 мг/м^3 при сжигании угля [4]. При сжигании торфа ограничение составляет 250 мг/м^3 для установок мощностью 100–300 МВт и 200 мг/м^3 для установок мощностью более 300 МВт. Авторы работы [8], в зависимости от топливного коэффициента (отношение связанного углерода к выходу летучих) различных марок углей, сжигаемых на ТЭС России, предлагают установить разные допустимые нормы по выбросам NO_x в атмосферу.

Рассмотрим проблему оптимизации режимов сжигания топлива с энергетической и экологической точек зрения на примере котлоагрегата БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Контроль температуры факела, обеспечивающей минимально возможную эмиссию NO_x , может осуществляться несколькими способами: с помощью газоанализаторов (ДАГ-500 и др.), пирометрическими способами или по температуре уходящих газов. Так как применение газоанализаторов носит эпизодический характер, а температура уходящих газов не даёт полной картины о распределении температур по высоте факела, для постоянного контроля и измерения температуры горения в топке парового котла БКЗ-210-140Ф наиболее предпочтительными являются оптические (бесконтактные) методы измерения. Следует отметить, что существующие бесконтактные методы измерения температуры продуктов сгорания в топках энергетических котлов на данный момент не являются универсальными, и их использование возможно только после предварительного изучения параметров котлоагрегата, особенностей используемого топлива и спектра излучения продуктов сгорания.

Целью настоящей работы является оптимизация метода пирометрического определения температуры продуктов сгорания по полосе поглощения CO_2 с последующим контролем образования оксидов азота при факельном сжигании твёрдых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

Объекты и методы исследования

Паровой котёл БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании твёрдых топлив исполь-

Таблица 1 / Table 1

Характеристики торфа и угля / Peat and coal characteristics

Наименование показателя / Parameter	Торф / Peat	Уголь / Coal
Содержание влаги W^r , % / Moisture W^r , %	51,8	12
Зольность A^r , % / Ash content A^r , %	6,3	15
Содержание серы S^r , % / Sulfur S^r , %	0,3	0,4
Содержание углерода C^r , % / Carbon C^r , %	24,3	57,1
Содержание водорода H^r , % / Hydrogen H^r , %	2,6	4,1
Содержание азота N^r , % / Nitrogen N^r , %	1,4	1,8
Содержание кислорода O^r , % / Oxygen O^r , %	13,3	9,6
Низшая теплота сгорания Q^r , ккал/кг (кДж/кг)	1933	3673
Lowest combustion heat Q^r , kcal/kg (kJ/kg)	(8093)	(15378)
Выход летучих веществ V^{daf} , % / Volatile matter content V^{daf} , %	50	42

Таблица 2 / Table 2

Состав продуктов сгорания (в %) при сжигании торфа и угля
Composition of combustion products (%) from peat and coal combustion

Состав продуктов сгорания Composition of combustion products	Торф / Peat	Уголь / Coal
Химический состав конденсированной фазы Chemical composition of condensed phase		
Содержание золы в продуктах сгорания Ash content in the combustion products	1,1	1,5
SiO_2	47,59	59,3
Al_2O_3	18,96	21
Fe_2O_3	20,84	5,7
CaO	4,88	5,3
K_2O	1,22	3,8
MgO	0,62	2,2
P_2O_5	4,02	0,8
TiO_2	0,45	0,9
Na_2O	0,38	–
SO_3	0,55	–
Химический состав газовой фазы / Chemical composition of gas phase		
Содержание газа в продуктах сгорания Gas content in the combustion products	98,9	98,5
H_2O	10,2	5,5
CO_2	17,7	20,7
SO_2	0,1	0,07
N_2	66,9	68,8
O_2	4,0	3,5

Примечание: Прочерк означает отсутствие компонента.
Note: A dash means the absence of a component.

зует фрезерный торф или уголь. Благодаря использованию местных видов топлива на Кировской ТЭЦ-4 достигается топливная независимость от поставщиков топлива на случай чрезвычайных ситуаций, а также снижаются логистические затраты. Поставки фрезерного торфа обеспечиваются с предприятия АО ВяткаТорф, расположенного в Кировской области. Поставки каменного угля, как резервного вида топлива, производятся с предприятий

Кузнецкого угольного бассейна. В качестве примера приводятся характеристики торфа с месторождений Кировской области и характеристики Кузнецкого угля (табл. 1). Расход топлива в котле БКЗ-210-140Ф составляет 40,4 т/ч при сжигании торфа и 33,16 т/ч при сжигании угля.

Из таблицы 1 следует, что торф и уголь отличаются по всем показателям: зольности A^r , влажности W^r , выходу летучих веществ V^{daf} ,

содержанию серы S^r , калорийности Q^r и др. Из-за сравнительно низкой калорийности торф на Кировской ТЭЦ-4 сжигается в смеси с природным газом для обеспечения стабильности работы котла. Гетерогенные продукты сгорания при сжигании торфа и угля представляют собой смесь частиц конденсированной фазы (КФ) [9] и газовой фазы (ГФ). В качестве примера составы КФ и ГФ, рассчитанные по продуктам полного сгорания [10], для торфа и угля приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что состав отличается количественно, а качественно практически совпадает. Поэтому торф иногда называют молодым углём.

Основным видом переноса тепла от горящего факела и продуктов сгорания к экранным поверхностям котла является излучение (до 95%). Излучение продуктов сгорания несёт информацию о химическом составе излучающей среды, её агрегатном состоянии и температуре. Основные факторы и параметры, определяющие тепловое излучение, подробно рассмотрены в работе [11]. Для расчёта спектральных и интегральных характеристик излучения (плотностей потоков энергии излучения F_λ и излучательной способности ϵ_λ) необходима достоверная исходная информация по КФ и ГФ, что само по себе представляет самостоятельную и сложную задачу.

В данной работе расчёт спектральных плотностей потоков энергии излучения F_λ и спектральных излучательных способностей ϵ_λ проводился по разработанной нами программе «Спектр» [12]. В основе этой программы лежит решение интегро-дифференциального уравнения для гетерогенных продуктов сгорания, т. е. для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Для условий котла БКЗ-210-140Ф в соответствии с базой исходных данных [11] произведены расчёты характеристик излучения факела продуктов сгорания в спектральном интервале $\lambda = 1-10$ мкм при сжигании торфа и угля. Некоторые результаты расчётов представлены на рисунке 2 (см. цв. вкладку VI). Из характера F_λ и ϵ_λ следует, что в интервале

$\lambda = 1-10$ мкм на сплошной спектр КФ накладывается ярко выраженный селективный спектр ГФ (рис. 2). Из всех полос излучения – H_2O ($\lambda = 1,9$ мкм, $\lambda = 2,7$ мкм), CO_2 ($\lambda = 4,1-4,4$ мкм) и т. д. наиболее представительной и стабильной является полоса CO_2 как при сжигании торфа, так и угля. Отличие спектров F_λ , ϵ_λ для торфа и угля в окнах прозрачности газовой фазы (1,6 мкм, 3,9 мкм и др.) возникает из-за различия массовой доли частиц КФ при сжигании торфа и угля. Для изучения продуктов сгорания бесконтактным оптическим методом выбран пирометр Optris CTPlaser F2 с рабочей длиной волны излучения $\lambda = 4,24$ мкм для полосы поглощения CO_2 .

Кажущаяся простота определения температуры пирометрическим способом является настолько заманчивой, что многие исследователи используют пирометрический метод, не уделяя должного внимания выбору устанавливаемой на пирометрах величины ϵ , которая зависит от большого числа факторов. Мы для этой цели пользовались программой «Спектр», достоверность расчётов по которой была подтверждена в работе [11] сопоставлением с расчётными и экспериментальными данными [13, 14] для более жёстких условий.

В таблице 3 представлены некоторые расчётные значения спектральной излучательной способности ϵ_λ ($\lambda = 4,24$ мкм), которая устанавливается на пирометре с соответствующим приёмником излучения и даёт возможность корректного определения температуры продуктов сгорания бесконтактным методом.

На котле БКЗ-210-140Ф на различных режимах работы при сжигании торфа и угля с помощью пирометра Optris измеряли температуру продуктов сгорания в зависимости от установленной на пирометре ϵ_λ в пределах 0,5–1,0 с шагом $\Delta\epsilon = 0,1$. Схема котла БКЗ-210-140Ф с расположением смотровых лючков представлена на рисунке 3.

Результаты и обсуждение

Экспериментальное измерение температуры продуктов сгорания при сжигании торфа

Таблица 3 / Table 3
Расчетные значения спектральной излучательной способности ϵ_λ при сжигании торфа и угля
Calculated values of emissivity factor ϵ_λ from peat and coal combustion

Заданная температура T , К / The set temperature T , К	Торф / Peat	Уголь / Coal
873	0,852	0,815
1073	0,922	0,898
1273	0,964	0,947
1473	0,986	0,975

В. А. Кузьмин, И. А. Заграй, И. А. Десятков
«Контроль образования оксидов азота в топке
парового котла с целью защиты
атмосферного воздуха от загрязнения». С . 126.

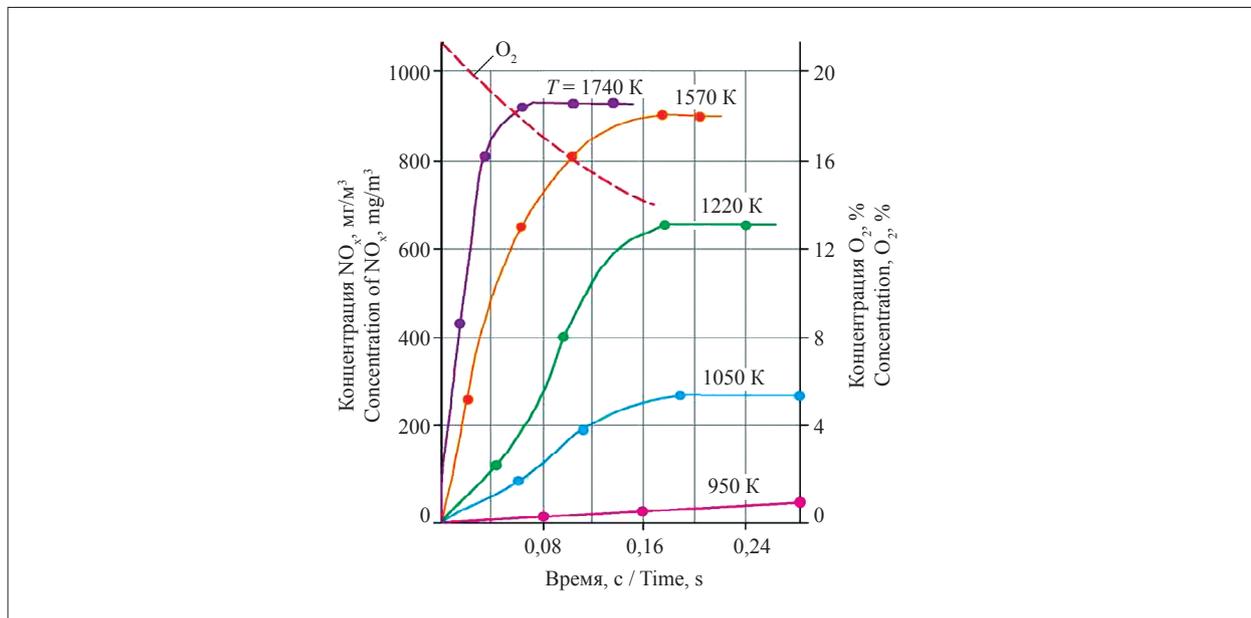


Рис. 1. Влияние температуры на образование топливных оксидов азота при сжигании угольной пыли [6]
Fig. 1. Influence of temperature on the formation of fuel nitrogen oxides during the coal dust combustion [6]

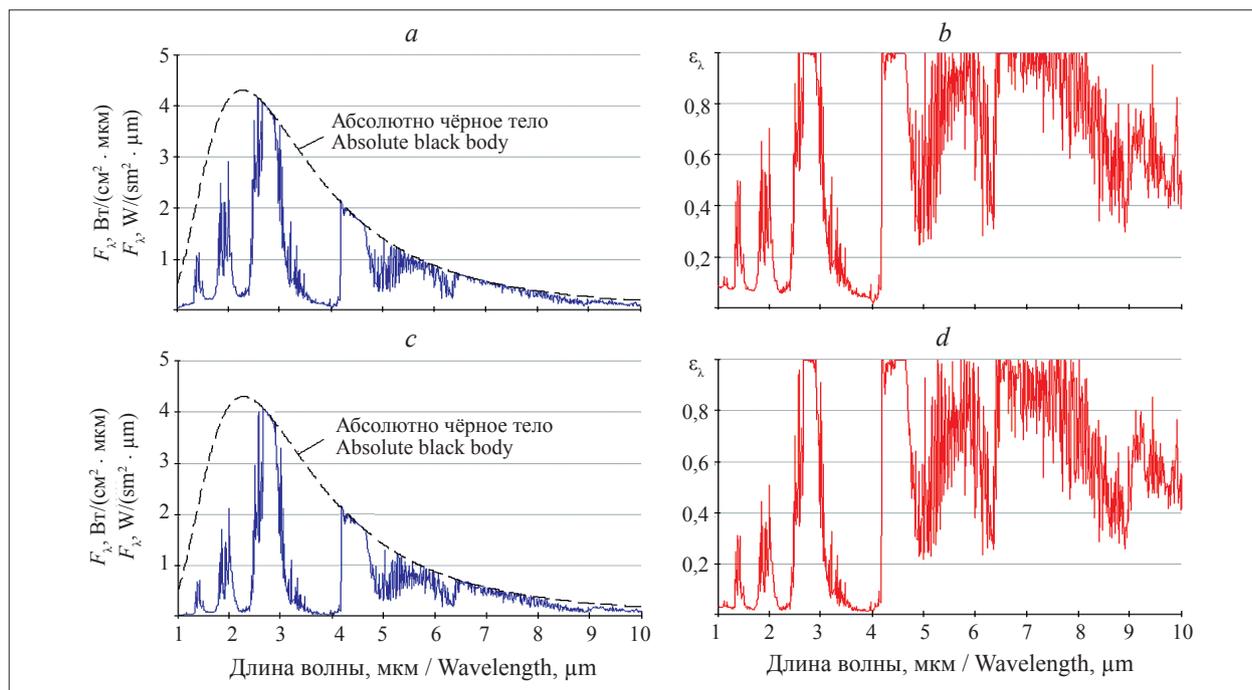


Рис. 2. Характеристики излучения продуктов сгорания при сжигании торфа (*a, b*) и угля (*c, d*) при $T = 1273$ К
Fig. 2. Emission characteristics of combustion products from peat (*a, b*) and coal (*c, d*) combustion at $T = 1273$ К

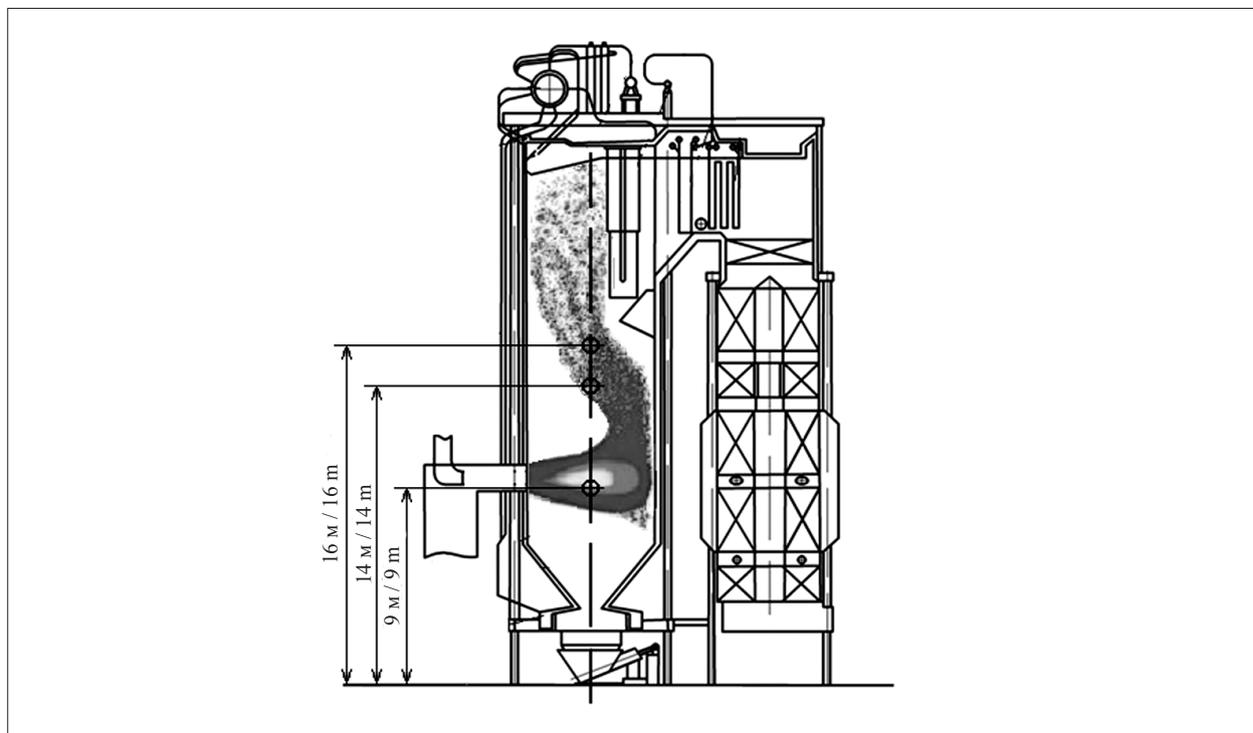


Рис. 3. Схема котла БКЗ-210-140Ф с расположением смотровых лючков
 Fig. 3. The scheme of the boiler BKZ-210-140F with the placement of inspection hatches

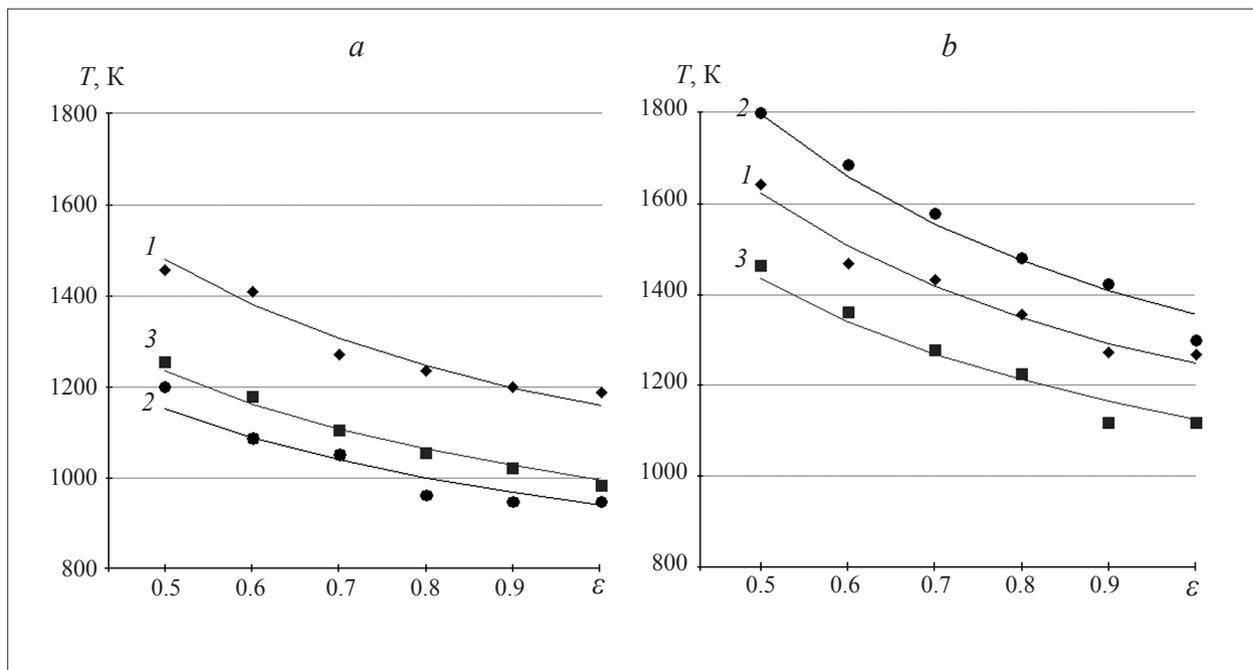


Рис. 4. Значения температур (T , К), измеренных пирометром для торфа (а) и угля (б):
 1 – $H = 9$ м, 2 – $H = 14$ м, 3 – $H = 16$ м
 Fig. 4. The temperature measurement results (T , К) using the pyrometer for peat (а) and coal (б):
 1 – $H = 9$ м, 2 – $H = 14$ м, 3 – $H = 16$ м

Таблица 4 / Table 4

Значения температур (T , К), полученных с помощью функций $T = f(\epsilon)$ пирометра Opttris для торфа и угля / Values of temperatures (T , K) obtained by the pyrometers' functions $T = f(\epsilon)$ for peat and coal

Топливо / Fuel	H , м H , m	Заданная температура T , К The set temperature T , K			
		873	1073	1273	1473
Торф / Peat	9	1219	1187	1170	1161
	14	981	960	948	942
	16	1042	1018	1005	998
Уголь / Coal	9	1339	1293	1269	1257
	14	1463	1410	1382	1367
	16	1203	1165	1145	1135

Примечание: жирным шрифтом выделены экспериментальные значения температуры, наиболее близкие к заданным (теоретическим).

Note: the values of experimental temperatures that are closest to the set (theoretical) ones are highlighted in bold.

и угля с помощью пирометра Opttris (4,24 мкм) в зависимости от установленной на нём ϵ_λ проводилось на высотах котла $H = 9$ м (на уровне горелок), 14 м и 16 м. Результаты $T = f(\epsilon)$ представлены на рисунке 4.

С помощью расчётных данных степени черноты ϵ_λ , полученной по программе «Спектр» (табл. 3), проведена оценка температуры продуктов сгорания. Результаты, полученные с помощью экспериментальных функций $T = f(\epsilon)$ и расчётных ϵ_λ , представлены в таблице 4. Предлагаемый подход для определения температуры с помощью пирометра основан на выборе экспериментального значения температуры, наиболее близкого к заданному (теоретическому). В таблице 4 соответствующие значения температуры выделены жирным шрифтом.

Температура газовой фазы в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1170 К при сжигании торфа и 1269 К при сжигании угля, а в хвостовой части ($H = 16$ м) 1018 К и 1165 К соответственно.

Спектральные излучательные способности, полученные расчётным путём (табл. 3), соответствуют значениям температур T , полученным из экспериментальной зависимости $T = f(\epsilon)$ (рис. 4). А эти экспериментально полученные значения T соответствуют величине концентрации NO_x (рис. 1, см. цв. вкладку VI) на разных высотах H .

На основании рисунка 1 и величины температуры на начальном участке факела (1170 К) при сжигании торфа время образования NO_x составляет менее 0,2 с, что соответствует высоте H около 11 м. На данной высоте завершается образование топливных NO_x в топке котла БКЗ-210-140Ф. Это соответствует корневой части факела при максимальной концентрации NO_x равной 500–600 мг/м³.

Образование NO_x при сжигании угля происходит на начальном участке факела (1269 К), при горении летучих веществ, выделившихся из частиц топлива. Время образования NO_x составляет менее 0,18 с и соответствует высоте H около 10,8 м. Максимальная концентрация NO_x составляет 650–700 мг/м³.

Методика данной работы, включающая расчётные исследования по определению спектральной излучательной способности, важна для корректного определения температуры продуктов сгорания для любого котла (парового или водогрейного) при использовании различных топлив. Оперативное измерение пирометрической установкой температурного режима факела котла позволяет добиваться необходимого регламентом уровня выбросов оксидов азота NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$).

Заключение

Представленная методика определения температуры с использованием пирометра Opttris с рабочей длиной волны 4,24 мкм дала возможность измерить значения температур продуктов сгорания в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля, что позволило провести текущую оценку уровня образования оксидов азота.

Предложенная методика измерения температуры продуктов сгорания позволит поддерживать требуемый уровень экологической безопасности выбрасываемых в атмосферу дымовых газов от предприятий промышленной теплоэнергетики.

Методика измерения температуры продуктов сгорания может быть использована при сжигании различных топлив (газообразных, жидких и твёрдых), что позволит соблю-

дать экологические нормы по атмосферным выбросам для любых котельных агрегатов.

References

1. Roslyakov P.V. Modern air protection technologies at thermal power plants (review) // *Thermal Engineering*. 2016. V. 63. No. 7. P. 495–510. doi: 10.1134/S0040601516070077
2. Belikov S.E., Kotler V.R. Boilers of thermal power plants and protection of the atmosphere. Moskva: Akva-Term, 2008. 212 p. (in Russian).
3. Kreynin E.V., Mikhalina E.S. Atmosphere pollutant emissions in electric-power industry // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2003. No. 2. P. 22–26 (in Russian).
4. Sheverdjaev O.N., Gvozdev V.M., Pahomov A.V., Majorshina L.I. Methods for reducing nitrogen oxide emissions from pulverized coal boilers // *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2010. No. 4 (66). P. 58–63 (in Russian).
5. Belikov S.E. Analysis of the regularities of nitrogen oxides formation in the construction of mathematical models of the fuel combustion process // *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2005. No. 5 (37). P. 48–51 (in Russian).
6. Babiy V.I., Kotler V.R., Verbovetskiy E.H. Mechanism of formation and methods of suppression of nitrogen oxides in pulverized coal boilers // *Energetik*. 1996. No. 6. P. 8–13 (in Russian).
7. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // *Official Journal of the European Union*. 2010. P. L334/17–L334/119.
8. Kotler V.R., Batorshin V.F. Choice and justification the permissible specific emissions of nitrogen oxides from coal-fired boilers // *Elektricheskie stantsii*. 2016. No. 12 (1025). P. 27–31 (in Russian).
9. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Research of dispersity and chemical composition of particles in the combustion products at gas-peat mixture burning in the steam boiler BKZ-210-140F // *Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki*. 2016. No. 5–6. P. 55–63 (in Russian).
10. Heat calculations for boilers. Guideline approach / Eds. N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovsky, E.S. Karasina. Moskva: Ekolit, 2011. 296 p. (in Russian).
11. 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. V. 26. No. 2. P. 291–294. doi: 10.1134/S0869864319020112
12. Kuzmin V.A., Zagrai I.A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 891. No. 1. Article No. 012226. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012226
13. Klein L., Penzias G.J. Spectral radiances of model rocket exhaust gases at simulated altitude measured with a rapid-scanning spectrometer // *AIAA Journal*. 1967. V. 5. No. 9. P. 1690–1692.
14. Nelson H.F. Influence of particulates on infrared emission from tactical rocket exhaust // *J. Spacecraft and Rockets*. 1984. V. 21. No. 5. P. 425–432.