

## ВЛИЯНИЕ БАЛЛАСТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ЗОНЕ ИНТЕНСИВНОГО ГОРЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

**Л.Е. Лымбина**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

На основе рассмотрения системы подготовки и подачи компонентов горения с учетом особенностей процессов сжигания в топках котельных агрегатов определены требования к характеристикам топливного потока и его составу. На различных стадиях подготовки в топливный поток подаются или проникают избыточный воздух и водяной балласт, что отражается на характеристиках процесса горения и теплообмена в агрегате. Роль балласта рассмотрена в две стадии – вначале определено влияние избыточного воздуха на поток с радиационными свойствами продуктов сгорания твердого топлива трех составов. Затем определено комплексное влияние избыточного воздуха и дополнительной воды на поток собственного излучения при сжигании каменного угля, сернистого мазута, природного и промышленного газов. Для оценок использованы фундаментальные соотношения законов сохранения, а также нормативные данные по характеристикам и свойствам рассмотренных топлив. В результате анализа определен комплексный показатель снижения температуры газов, названный коэффициентом тепловой депрессии. С учетом коэффициента депрессии рассчитаны потоки собственного излучения для четырех типов модельного топлива и обсуждены варианты применения полученных результатов.

*Ключевые слова:* энергетическое топливо, котельный агрегат, балласт, коэффициент тепловой депрессии, радиационный теплообмен.

### **Введение**

Перед подачей смеси топлива с окислителем в зону интенсивного горения (ЗИГ) компоненты горения готовятся в системах подготовки компонентов горения, которые сконструированы в соответствии с агрегатным состоянием топлива и его характеристиками.

Задача системы подачи и подготовки компонентов горения заключается в достижении требуемых характеристик, отвечающих вопросу создания адекватных условий для сжигания топлива и передачи теплоты рабочему телу. Эти характеристики должны давать возможность общего описания системы подготовки и подачи топлива для получения однозначных функций для зоны интенсивного горения (ЗИГ). На различных стадиях подготовки смеси в нее вводятся избыточный воздух и водяной балласт, что отражается на процессах горения и теплообмена.

Общими требованиями независимо от вида сжигаемого топлива являются создание необходимых условий для качественного перемешивания компонентов горения, которые должны обеспечить надежное воспламенение и эффективное выгорание топлива при достижении соответствующей температуры горения.

### **1. Постановка задачи и анализ требований к процессу горения топлива**

Ниже приведены результаты расчетно-теоретического анализа влияния содержания избыточ-

ного воздуха и дополнительной воды на радиационные характеристики продуктов сгорания трех видов модельного твердого топлива по изменению плотности собственного излучения недиатермичных газов  $RO_2 = CO_2 + SO_2$  и паров  $H_2O$  с учетом их температуры и размеров газового излучающего слоя. Влияние минеральной части топлива  $A^p$  проявляется через изменение содержания «летучей» золы и связанным с ним вкладом твердых частиц в газовую фазу в процесс излучения. Изменение состава газообразных продуктов сгорания приводит к изменению их теплофизических свойств, в первую очередь теплоемкости и теплопроводности, а изменение количества газовой среды отражается на режиме и характере течения и конвективного теплообмена в элементах тепловоспринимающих поверхностей [1, 2].

Эффективность работы топочных устройств котельных агрегатов (КА) и достаточно полное сжигание в них топлива могут быть достигнуты только при соответствующей организации всех протекающих в топочном объеме физико-химических и тепловых процессов. Адекватными свойствам топлива должны быть конструкция топливо-сжигающих устройств (ТСУ), их мощность, тип, способ организации процессов смешения компонентов горения в ТСУ и в топочном объеме. От этих параметров также зависят характеристики движения потоков воздуха, топлива и топочных газов, перенос горящих объемов и компонентов горения в топке КА, нагрев их до температуры

воспламенения и последующие за этим физико-химические преобразования, перенос выделяемой при горении теплоты в объеме топочной камеры, преобразование негорючего остатка топлива и т. п. Результирующим процессом в этой технологической цепи является передача теплоты от топочных газов к нагреваемым теплоносителям – воде, пароводяной смеси, пару и воздуху в воздухоподогревателях. Все эти процессы протекают в зависимости от характеристик топлива и продуктов сгорания.

От характеристик энергетического топлива и его качества также зависят такие конструктивно-режимные параметры, как тепловая мощность КА и отдельного ТСУ, регулируемость процесса горения, минимум затрат энергии на собственные нужды КА и потерь энергии с химическим и механическим недожогом топлива. В этом ряду также стоят эксплуатационные характеристики: надежность, безопасность и простота обслуживания, ремонтпригодность, метало- и материалоемкость и др. Краткий и неполный перечень требований к топочным процессам дает возможность понять, что задача оценки качества энергетического топлива – многопараметрическая, которую можно разделить на ряд частных задач. При этом основными правилами оценки должны быть закон сохранения массы в форме материального баланса процесса горения, закон сохранения энергии в форме теплового баланса и закон Гесса, определяющий независимость теплового эффекта реакции горения от схемы реализации процесса.

Теплотехнические качества энергетического топлива в значительной степени определяются соотношением органической и минеральной части и содержанием и видом балластных составляющих в продуктах сгорания – золы  $A^p$  и влаги  $W^p$ . Технология применения топлива на ТЭС и промпредприятиях позволяет выделить технологические характеристики топлива: плотность и пористость, сыпучесть, гранулометрический состав, выход летучих и спекаемость, механическую прочность и способность к самовозгоранию. Часть этих показателей и характеристик взаимозависима и оказывает влияние на процессы горения и теплообмена [3].

## 2. Влияние балласта на излучательную способность ПС твердого топлива

В первой части работы поставлена задача – определить влияние увеличения коэффициента избытка воздуха от стехиометрического  $\alpha = 1,0$  до  $\alpha = 1,1; 1,2; 1,3$  и дополнительной влаги сверх  $W^p$  на радиационные характеристики продуктов сгорания трех типов модельного твердого топлива – кузнецкого каменного угля марки «Д» с  $Q_H^{p,h} = 21,90$  МДж/кг, кузнецкого антрацита марки «А» с  $Q_H^{p,h} = 24,16$  МДж/кг и челябинского бурого угля марки «ЗБ» с  $Q_H^{p,h} = 12,56$  МДж/кг. Состав

продуктов сгорания при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}; 0,1013$  МПа) и при стехиометрическом сжигании и общий выход продуктов сгорания на кг топлива приведены в нормативных материалах [1, 2], там же приведены влажность  $W^{p,h}$ , содержание золы  $A^{p,h}$  и другие характеристики этих топлив. Верхний индекс «н» здесь и далее означает, что величина взята из нормативных материалов. Затем эти соотношения будут распространены на топлива других видов.

Ниже приведены результаты расчетно-теоретического анализа влияния содержания избыточного воздуха и дополнительной воды на радиационные характеристики продуктов сгорания трех видов модельного твердого топлива по изменению плотности собственного излучения недиатермичных газов  $RO_2 = CO_2 + SO_2$  и паров  $H_2O$  с учетом их температуры и размеров газового излучающего слоя. Влияние минеральной части топлива  $A^p$  проявляется через изменение содержания «летучей» золы и связанным с ним вкладом твердых частиц в газовой фазе в процесс излучения. Изменение состава газообразных продуктов сгорания приводит к изменению их теплофизических свойств, в первую очередь теплоемкости и теплопроводности, а изменение количества газовой среды отражается на режиме и характере течения и конвективного теплообмена в элементах тепловоспринимающих поверхностей.

При увеличении влажности сверх нормативной за счет смешения топлива с водой в количестве  $g_b$ , кг воды на кг смеси, снижается теплота сгорания смеси  $Q_H^{p,cm}$ , МДж/кг смеси

$$Q_H^{p,cm} = (1 - g_b) Q_H^{p,h} \quad (1)$$

и требуемое количество воздуха,  $m^3/kg$  смеси, при  $\alpha = 1,0$

$$V_B^{0,cm} = (1 - g_b) V_B^{0,h} \quad (2)$$

при увеличении расхода воздуха больше стехиометрического  $\alpha \geq 1,0$

$$V_B^{\alpha,cm} = \alpha (1 - g_b) V_B^{0,h} \quad (3)$$

Количество  $RO_2$  в продуктах сгорания,  $m^3/kg$  смеси, связано только с горючей частью топлива и может быть определено по формуле

$$V_{RO_2}^{cm} = (1 - g_b) V_{RO_2}^h \quad (4)$$

Количество водяных паров в продуктах сгорания  $V_{H_2O}$ ,  $m^3/kg$  смеси, связано с уменьшением поступления  $H_2O$  с влажным воздухом и дополнительным поступлением воды при ее расходе  $g_g$ :

$$V_{H_2O}^{\alpha,cm} = (1 - g_b) V_{H_2O}^{0,h} + 0,0161(\alpha - 1) V_B^{0,cm} + 1,244 g_b \quad (5)$$

Аналогично определяется количество азота  $V_{N_2}$  и избыточного кислорода  $V_{O_2}^{\alpha,cm}$ ,  $m^3/kg$  смеси:

$$V_{N_2}^{\alpha,cm} = (1 - g_b) V_{N_2}^{0,h} + 0,79(\alpha - 1) V_B^{0,c} \quad (6)$$

$$V_{O_2}^{\alpha,cm} = 0,21(\alpha - 1) V_B^{0,h} \quad (7)$$

Численные коэффициенты в формулах (5)–(7) означают: 0,0161 = 1,24·0,013 – поступление водяных паров с избыточным воздухом, имеющим влажность 0,013 кг/м<sup>3</sup> и удельный объем 1,24 м<sup>3</sup>/кг; 0,21 и 0,79 – объемные доли кислорода и азота в воздухе.

Общее количество продуктов сгорания  $V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}}$ , м<sup>3</sup>/кг смеси, определяется суммированием расчетных величин по формулам (4)–(7):

$$V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}} = V_{\text{RO}_2}^{\alpha, \text{см}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\alpha, \text{см}} + V_{\text{N}_2}^{\alpha, \text{см}} + V_{\text{O}_2}^{\alpha, \text{см}}. \quad (8)$$

Эти данные позволяют определить объемную долю трехатомных, участвующих в переносе теплоты излучения, газов  $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в объеме продуктов сгорания смеси топлива с водой при избытке воздуха  $r_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}^{\alpha, \text{см}} / V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}}$ ,  $r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\alpha, \text{см}} / V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}}$  и их парциальное давление и рассчитать плотность потока собственного излучения этих компонентов, Вт/м<sup>2</sup>, по формулам первого порядка точности [4, 5]:

$$E_{\text{RO}_2} = 3,5 (p_{\text{RO}_2} l)^{0,33} (T/100)^{3,5}, \quad (9)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 3,5 p_{\text{H}_2\text{O}}^{0,8} l^{0,6} (T/100)^{3,0}. \quad (10)$$

Количество теплоты, содержащееся в единице топлива, при добавке дополнительной влаги в количестве  $g_{\text{в}}$  определяется с учетом дополнительных затрат теплоты на ее испарение ~ 2,5 МДж/кг:

$$Q_{\text{расп}} = Q_{\text{н}}^{\text{р, см}} - 2,5 g_{\text{в}} = (1 - g_{\text{в}}) Q_{\text{н}}^{\text{р, н}} - 2,5 g_{\text{в}}, \quad (11)$$

откуда определяется энтальпия продуктов сгорания топлива при разбавлении его балластом – избыточным воздухом и дополнительной влагой, то есть, топливной смеси

$$i_{\Gamma} = Q_{\text{расп}} / V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}}. \quad (12)$$

В зависимости (11) в правой части первое слагаемое определяет фактор балластирования топлива дополнительной влагой, что снижает теплоту сгорания образующейся смеси; но переход от  $Q_{\text{н}}^{\text{р, см}}$  к  $Q_{\text{расп}}$  отражает влияние дополнительных затрат тепловой энергии на испарение этой влаги. В том случае, когда дополнительная влага вводит-

ся в виде водяного пара  $Q_{\text{расп}} = Q_{\text{н}}^{\text{р, см}}$ , то есть второе слагаемое в правой части уравнения (11) отсутствует.

При расчете температуры образовавшихся продуктов сгорания, соответствующих  $i_{\Gamma}$ , необходимо энтальпию разделить на теплоемкость продуктов сгорания  $c_{\Gamma}$  при этой температуре:  $t_{\Gamma} = i_{\Gamma} / c_{\Gamma}$ , причем теплоемкость при постоянном давлении определяется по составу в соответствии с (8) и с пересчетом на объемные доли  $r_{\text{RO}_2}$ ,  $r_{\text{H}_2\text{O}}$  и т. д.

Следует отметить, что в [1] из соображений упрощения балансовых расчетов принято определять энтальпию не на 1 м<sup>3</sup> или 1 кг фактических продуктов сгорания, а на м<sup>3</sup> или кг продуктов сгорания, получающихся от сгорания 1 м<sup>3</sup> или 1 кг топлива, что не соответствует термодинамическому определению энтальпии, поэтому  $i_{\Gamma} = I_{\Gamma}^{\text{н}} / V_{\Gamma}^{\alpha, \text{см}}$ , где  $I_{\Gamma}^{\text{н}}$  – энтальпия, определенная по нормативной методике.

В зависимостях (9)–(10) парциальное давление излучающих газов определяется в функции давления в топке КА, то есть для КА с уравновешенной тягой общее давление принимается равным атмосферному 0,1013 МПа, тогда  $p_{\text{RO}_2} = 0,1013 r_{\text{RO}_2}$ ,  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1013 r_{\text{H}_2\text{O}}$ .

В табл. 1, 2 приводятся результаты оценочно-го анализа по описанной выше методике влияния избыточного воздуха и дополнительной воды на радиационные свойства топочной среды. В табл. 1 анализируется влияние только избыточного воздуха на плотность потока собственного излучения  $E_{\text{RO}_2}$  и  $E_{\text{H}_2\text{O}}$  при отсутствии дополнительной воды  $g_{\text{в}} = 0$  и при изменении температуры газового слоя толщиной  $l = 3,0$  м от 1300 до 1500 К.

В табл. 2 анализируется влияние температуры топочной среды на ее излучательные свойства для сильно увлажненных кузнецких углей марки «Д» и «А» и челябинского угля марки «ЗБ»; увлажнению  $g_{\text{в}} = 0,4$  кг дополнительной  $\text{H}_2\text{O}$  на кг смеси соответствует создание водоугольного топлива, пригодного для транспортировки топлива трубопро-

Таблица 1

Радиационные свойства продуктов сгорания при  $g_{\text{в}} = 0$ ,  $\alpha = \text{var}$ 

Уголь: бассейн, марка	Температура, К	Плотность потока собственного излучения, $E_{\text{RO}_2} / E_{\text{H}_2\text{O}}$ , Вт/м <sup>2</sup>			
		$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$
Кузнецкий, Д	1500	4897,5/176,1	4758,4/165,5	4632,5/156,8	4518,3/149,3
	1400	3846,8/143,2	3737,6/134,6	3638,7/127,5	3589,0/121,4
	1300	2967,9/114,6	2883,7/107,8	2807,4/102,1	2837,1/97,2
Кузнецкий, А	1500	5100,4/106,4	4951,7/99,1	4813,3/96,3	4691,6/92,2
	1400	4006,2/86,5	3889,4/80,6	3780,7/78,3	3685,1/75,0
	1300	3090,9/62,2	3000,8/64,5	2916,9/62,7	2843,2/60,1
Челябинский, ЗБ	1500	4858,6/217,9	4728,0/205,2	4607,2/194,2	4496,2/184,4
	1400	3816,3/177,2	3713,7/166,8	3618,8/157,9	3531,6/149,9
	1300	2944,4/141,9	2865,2/133,5	2792,0/126,4	2724,7/120,0

Поток излучения топочной среды при  $l = 3,0$  м,  $\alpha = 1,1$ ,  $g_b = 0,4$

Уголь: бассейн, марка	Температура топочной среды, К		
	1300	1400	1500
Кузнецкий, Д	6761,8/647,5	8764,0/808,7	11157,7/994,6
Кузнецкий, А	10136,2/519,5	13137,8/648,4	16726,0/797,5
Челябинский, ЗБ	9446,3/847,2	12243,5/1058,1	15587,5/1301,4

водным транспортом. Приведенные выше зависимости отличаются от рекомендованных в нормативном методе [1, 2] учетом дополнительного количества влаги сверх естественной влажности топлива [6].

Чтобы учесть влияние изменения толщины газового слоя при  $l_1 \neq 3,0$  м, необходимо приведенные в табл. 1, 2 данные по радиационным свойствам газов умножить на поправочные множители  $0,696l_1^{0,33}$  для  $RO_2$  и  $0,517l_1^{0,6}$  для  $H_2O$ .

### 3. Коэффициент тепловой депрессии как показатель влияния балласта на излучательную способность ПС

На основе приведенных выше зависимостей можно определить общий коэффициент снижения теоретической энтальпии  $i_d$ , который определяется через коэффициент тепловой депрессии  $k_d = i_d / i_t$ . Опустив промежуточные преобразования, можно записать

$$k_d = \frac{1 - g_b (1 - 2,5 / Q_H^{p,cm})}{[1 - g_b (1 - 1,244 / V_\Gamma^0)] + 1,0161nV_\alpha^0 / V_\Gamma^0}, \quad (13)$$

где низшая теплота сгорания топлива в смеси с водой и дополнительным воздухом  $Q_H^{p,cm}$ , количество продуктов сгорания  $V_\Gamma^0$  и требуемое для сжи-

гания единицы топлива количество воздуха  $V_\alpha^0$  при стехиометрическом соотношении определяются по нормативно-справочным данным [1, 2] и соотношениям (1)–(12). Здесь также принято обозначение величины избытка воздуха  $n = (\alpha - 1)$ .

Для адаптации результатов расчета по зависимости (13) были выбраны четыре энергетических топлива различного агрегатного состояния и теплоты сгорания  $Q_H^{p,h}$ : кузнецкий уголь марки «Г» с  $Q_H^{p,h} = 16,33$  МДж/кг; сернистый мазут марки «40» с  $Q_H^{p,h} = 39,57$  МДж/кг; природный газ с  $Q_H^{p,h} = 35,8$  МДж/м<sup>3</sup>, а также смесь двух промышленных газов доменного и коксового (50 % / 50 %) с  $Q_H^{p,h} = 10,97$  МДж/м<sup>3</sup>.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента тепловой депрессии  $k_d$  от величины добавочной влаги  $g_b$ , кг/кг твердого и жидкого топлива и кг/м<sup>3</sup> газообразных топлив и от избытка воздуха  $n$ . Точке на оси ординат  $k_d = 1,0$  соответствует стехиометрическое горение всех четырех топлив без избытка воздуха и при отсутствии дополнительной влаги ( $\alpha = 1,0$ ,  $n = 0$ ,  $g_b = 0$ ). Этой серии линий соответствует влияние только избыточного воздуха при  $n > 0$ . Влиянию только дополнительной влаги соответствуют точки на оси ординат при

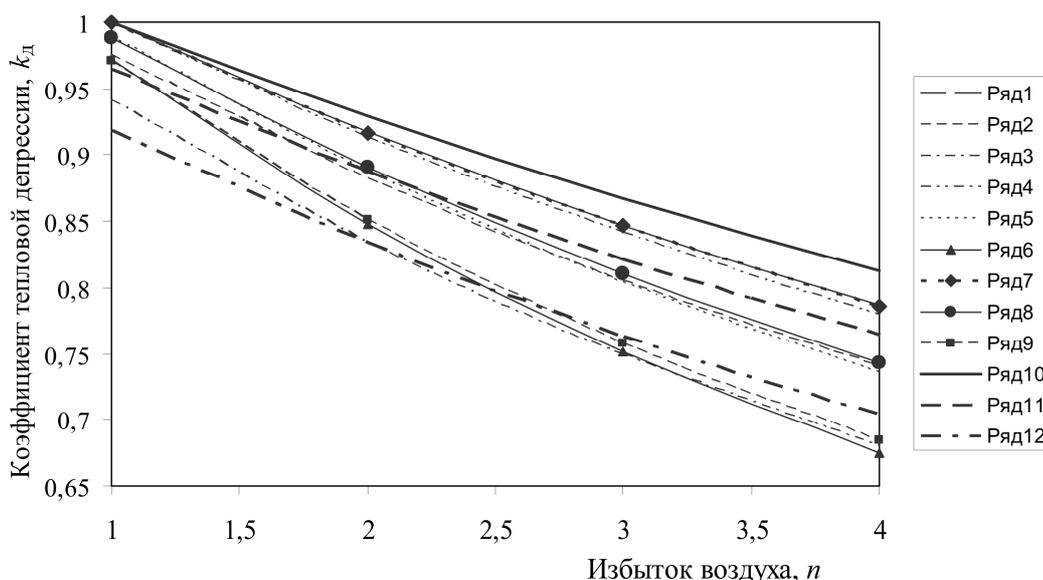


Рис. 1. Коэффициент тепловой депрессии в функции избытка воздуха  $n = 0,1(X - 1)$  и дополнительной влаги  $g_b$

$n = 0, g_b > 0$ . Отдельным кривым на рис. 1 соответствуют: каменный уголь – кривые 1, 2, 3 (при  $g_b = 0; 0,2$  и  $0,4$  соответственно); сернистый мазут – кривые 4, 5, 6 (при  $g_b = 0; 0,2$  и  $0,4$ ); природный газ – кривые 7, 8, 9 (при  $g_b = 0; 0,2$  и  $0,4$ ); промышленный газ (КДС) – кривые 10, 11, 12 (при  $g_b = 0; 0,2$  и  $0,4$ ).

В рамках поставленной задачи по определению влияния балласта можно полагать, что теоретической температуре при  $i_T$  соответствует температура при адиабатическом сжигании топлива без теплообмена с окружающей факел средой  $t_T \approx t_{ад}$ , которая входит в формулу для расчета температуры на выходе из топки [1, 2]. Таким образом,  $t_T = k_{д} t_{ад} C_{ад} / C_T$ ; учет влияния недожога, диссоциации продуктов сгорания, подогрева компонентов горения и других факторов можно произвести по известным соотношениям, используя понятие располагаемой теплоты топливной смеси по (11). Отношение теплоемкостей при адиабатической и теоретической температурах лежит в пределах 1,06...1,08, таким образом, график рис. 1 можно использовать для оперативной оценки температуры при сжигании забалластированных топлив.

#### 4. Влияние балласта на степень черноты газообразной части факела

Соотношения (9), (10) можно привести с помощью деления на собственное излучение абсолютно черного тела  $E_0 = 5,67(T/100)^4$  к виду:

$$\varepsilon_{\text{RO}_2} = C_{\text{RO}_2}^g (T_g/100)^{-0,5}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}}^g (T_g/100)^{-1,0}. \quad (15)$$

В приведенных зависимостях коэффициенты излучения определяются в соответствии с (9), (10)

$$C_{\text{RO}_2}^g = 0,61728 (p_{\text{RO}_2} l_T)^{0,33}, \quad (16)$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}}^g = 0,61728 p_{\text{H}_2\text{O}}^{0,8} l_T^{0,6}. \quad (17)$$

Соотношения (14)–(17) устанавливают излучательные свойства индивидуальных недиатермичных газов, которые участвуют в создании общего потока излучения и которые можно определить по графику и аналитическим зависимостям в работах [7–10]. Результат теплообмена потока продуктов сгорания топлива с ограждением и топочным газом определяется по потоку собственного излучения  $E_T = 5,67\varepsilon_T (T_g/100)^4$ , Вт/м<sup>2</sup>. При учете балласта его влияние двояко – абсолютная температура газового потока  $T_g$  снижается, но растет степень черноты  $\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{RO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon_T$ , в основном за счет степени черноты водяного пара, которая существенно превышает степень черноты углекислоты (см. табл. 1, 2). При различных схемах расположения горелок в ЗИГ [11] можно, используя закон сохранения энергии [12], получить распределение температуры по сечению потока на выходе из ЗИГ и на входе в основной объем топки.

При этом анализе необходимо учитывать роль золы и коксовых частиц в формировании потока излучения.

#### 5. Влияние содержания частиц золы и кокса на степень черноты ПС

При прохождении радиационных потоков через запыленный поток газа, который иногда называют мутным, часть излучения поглощается не только компонентами газовой смеси, но и самими твердыми частицами. В конечном итоге и поглощение, и рассеяние энергии ослабляют тепловое излучение. Причем если важен вопрос с изменением собственного излучения слоя среды, то внимание исследователя акцентируется на коэффициенте поглощения. Если вопрос заключается в работе потока излучения после прохождения слоя среды, то внимание исследователя сосредоточивается на коэффициенте ослабления. Таким образом, запыленный поток представляет гетерогенную среду, активно участвующую в теплообмене излучением и определяющую тепловое состояние всех тел системы – ограждения зоны, факельного континуума и топочной среды.

Суммарную поглощательную способность запыленного потока можно рассчитать по формуле, основанной на законе Бугера – Бера,

$$\varepsilon_{T+n} = 1 - \exp[-(\tau_g + \tau_n)], \quad (18)$$

где  $\tau_g$  и  $\tau_n$  – оптические толщины соответственно газового потока и слоя пылевидных частиц. Значение  $\tau_n$  зависит от концентрации, размеров, плотности частиц, их радиационных свойств и спектральных характеристик, температуры гетерогенной системы, эффективной длины луча и пр. Сложный характер связей между этими факторами не позволяет получить универсальной формулы для расчета оптической толщины слоя пылевидных частиц. С учетом этого в работе [13] предложены аппроксимации для расчета  $\tau_n$  в газопылевых потоках для золы ( $\mu_{эф} \approx 120$  г/м<sup>2</sup>):

$$\tau_n = 0,0153 \sqrt{\frac{T}{d_{32}^2}} \left\{ 1 - \frac{0,65}{\left[ 1 + 10^3 / (\mu_{эф})^2 \right]} \right\}, \quad (19)$$

где  $T$  – температура потока, К,  $d_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр частицы по Заутеру, мкм; при  $\mu_{эф} \leq 20$  г/м<sup>2</sup> выражение в фигурных скобках обращается в единицу и формула (19) упрощается.

Численный анализ показывает, что присутствие в потоке золы в пределах  $\mu = 4...6$  г/м<sup>3</sup> при  $l_{эф} = 3,0$  м с диаметром частиц  $d_{32} = 5$  мкм приводит к увеличению степени черноты  $\varepsilon_{T+n}$  на 20...25 %, причем меньшие значения относятся к максимальной добавке воды  $g_b = 0,4$ .

При сжигании жидкого и газообразного топлива в продуктах сгорания могут появиться частицы кокса и сажи при  $\mu_{эф} \leq 20$  г/м<sup>2</sup>, при этом опти-

ческая толщина потока определяется по формуле, которая через изменение  $\mu$  учитывает изменение концентрации и размеров частиц по мере их выгорания,

$$\tau_{\text{п}} = 0,04 \sqrt{\frac{T}{d_{32}}} (\mu l_{\text{эф}}). \quad (20)$$

Для оценки влияния балласта на радиационные свойства потока, содержащего кокс и сажу, необходимо применить линейную интерполяцию на отрезке  $[g_{\text{в}} = 0, \tau_{\text{п}} = 0,06] \leftrightarrow [g_{\text{в}} = 1,0, \tau_{\text{п}} = 0]$ , что дает зависимость  $\tau_{\text{п}} = 0,06(1 - g_{\text{в}})$ , и далее

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{г+п}} &= 1 - \exp[-(\tau_{\text{г}} + \tau_{\text{п}})] = \\ &= 1 - \exp\{-[\tau_{\text{г}} + 0,06(1 - g_{\text{в}})]\}. \end{aligned} \quad (21)$$

Как показывает анализ, увеличение степени черноты продуктов сгорания твердого топлива за счет присутствия золы снижается при увлажнении угольной массы от 25 до 18 % при увеличении содержания воды до 0,4 кг/кг водоугольной смеси. Аналогично влияние коксовых и сажевых частиц на излучение продуктов сгорания при увлажнении топлива; можно полагать, что влияние золы относится к твердому топливу, а коксовые и сажевые частицы выделяются при сжигании жидкого и газообразного топлив.

Оптическая толщина газообразной части топочной среды  $\tau_{\text{г}}$ , определяемая выражением  $\tau_{\text{г}} = \alpha l_{\text{эф}}$ , связана с глубиной проникновения фотонов и коэффициентом поглощения среды  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-1}$ . С применением теплофизических соотношений  $\tau_{\text{г}}$  определяется составом среды, концентрацией участвующих в переносе радиации газов, геометрией пространства, общим давлением и температурой среды. При оценке влияния этих факторов рационально определить  $\tau_{\text{г}}$  для среднего состава топочной среды с относительными объемными концентрациями  $r_{\text{CO}_2} = 0,013$ ,  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,011$  при общем

давлении 0,1 МПа; при  $l_{\text{эф}} = 3$  м; это дает, согласно данным Х. Хоттеля,  $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,115$  и  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,140$ . Применив соотношение Бугера – Бера, можно получить

$$\varepsilon_{\text{г}} = \alpha = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{CO}_2})(1 - \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}) = 0,2389 \quad (22)$$

и, подставив это значение в квадратную скобку формулы (21), получить оценки влияния оптической толщины при различном содержании водяного балласта: при  $g_{\text{в}} = 0 \rightarrow 25\%$ , при  $g_{\text{в}} = 0,2 \rightarrow 20\%$ , при  $g_{\text{в}} = 0,4 \rightarrow 15\%$ . Это снижение оптической толщины отражается на собственном излучении топочной среды.

При сжигании жидкого и газообразного топлив учет влияния образующейся сажи производится согласно [1, 2] в соответствии с отношением (С/Н) в топливе. При сжигании сернистого мазута в газоплотных котлах увеличение степени черноты связано с содержанием водяного балласта по зависимости

$$\varepsilon_{\text{г+в}} = \varepsilon_{\text{г}} + 0,053(1 - g_{\text{в}}), \quad (23)$$

при сжигании природного газа

$$\varepsilon_{\text{г+в}} = \varepsilon_{\text{г}} + 0,0176(1 - g_{\text{в}}), \quad (24)$$

при сжигании смеси доменного и коксового газов

$$\varepsilon_{\text{г+в}} = \varepsilon_{\text{г}} + 0,0577(1 - g_{\text{в}}). \quad (25)$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов по зависимостям (18)–(25) степени черноты газовой части продуктов сгорания (ПС) каменного угля: кривые 1, 2, 3 при избыточной влаге  $g_{\text{в}} = 0; 0,2$  и  $0,4$  соответственно; кривые 4, 5, 6 относятся к продуктам сгорания промышленного газа (КДС) при  $g_{\text{в}} = 0; 0,2$  и  $0,4$  соответственно; кривые 7, 8, 9 относятся к ПС сернистого мазута при  $g_{\text{в}} = 0; 0,2$  и  $0,4$  соответственно; кривые 10, 11, 12 относятся к ПС природного газа при  $g_{\text{в}} = 0; 0,2$  и  $0,4$  соответственно.

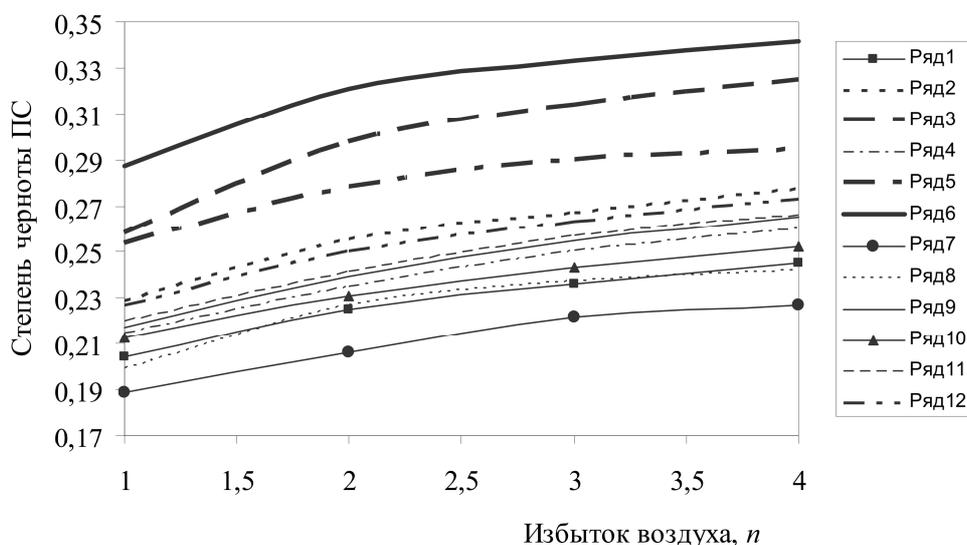


Рис. 2. Зависимость степени черноты продуктов сгорания (ПС) различных топлив от избытка воздуха  $n$  и количества дополнительной воды  $g_{\text{в}}$

Таблица 3

Соотношение  $E_{г+n}/E_{г}$  при изменении содержания балласта в топливе

	$n = 0$	$n = 0,1$	$n = 0,2$	$n = 0,3$
1.1, $g_g = 0$	230153/287691	187723/234654	150072/187590	121580/151975
1.2, $g_g = 0,2$	236662/289911	186741/228758	143016/175195	112043/137253
1.3, $g_g = 0,4$	235648/282778	179630/215556	131878/158254	98732/118478
2.1, $g_g = 0$	241630/306477	204378/237165	171858/187463	143715/150435
2.2, $g_g = 0,2$	251675/297539	207230/241627	165810/192202	132294/153043
2.3, $g_g = 0,4$	240818/269817	193075/213911	148668/164119	116484/128289
3.1, $g_g = 0$	236309/302575	188195/236614	152266/188700	120217/148273
3.2, $g_g = 0,2$	239667/290655	188651/223626	135096/160109	103085/121605
3.3, $g_g = 0,4$	245733/281744	168563/190991	119626/134544	86951/97385
4.1, $g_g = 0$	246263/266611	197670/212731	158272/169735	127988/136927
4.2, $g_g = 0,2$	244449/260094	186666/197572	146284/154298	111789/117706
4.3, $g_g = 0,4$	236771/247785	166039/173052	118224/122971	86836/90195

Результат теплообмена потока сгорающего в ЗИГ топлива с ограждением зоны и топочным газом определяется по потоку собственного излучения  $E_{г+n} = 5,67\epsilon_{г+n}(T_{г}/100)^4$ , Вт/м<sup>2</sup>. При учете балласта собственное излучение  $E_{г+n}$  испытывает двойное влияние: температура газового потока снижается согласно рис. 1, но растет степень черноты, согласно рис. 2. Результирующий анализ приведен в табл. 3.

В табл. 3 первый ряд данных (1.1–1.3) относится к продуктам сгорания каменного угля, второй ряд (2.1–2.3) к смеси промышленных газов, третий ряд (3.1–3.3) – к сернистому мазуту, четвертый ряд (4.1–4.3) – к природному газу.

Анализ показывает, что потоки собственного излучения снижаются от нулевых значений балластных составляющих к максимальным значениям:  $n = 0,3$  и  $g_v = 0,4$ , но интенсивность снижения различна, что отмечено в соотношениях (14)–(17). Эти потоки включаются в сложный теплообмен с участием факельных континуумов, топочного газа и ограждения ЗИГ, результат теплообмена приведен в работе [9] к обобщенному коэффициенту  $C_{эф}$ .

Существенное переувлажнение твердого топлива вплоть до  $g_v = 0,4$  получается при использовании водоугольного топлива (ВУТ), при этом показатели работы котла существенно меняются [11]. Температура в топке снижается на 150–250 °С, затягиваются процессы воспламенения и горения, возрастает температура газов на выходе из топки, усиливается шлакование поверхностей нагрева в этой части котла. Для ЗИГ рис. 1 дает снижение температуры на 372 °С при  $n = 0,1$ , для получения результата снижения температуры в основном объеме топки необходимо рассмотрение парадигмы теплообмена [13], для которой значения в ЗИГ являются граничными условиями.

Далее в работе [11] отмечается фактическое повышение температуры уходящих газов на 15–20 °С, заметно увеличиваются потери теплоты с недожогом как в уносе, так и в шлаке  $q_4$ , в результате снижение КПД котла при использовании ВУТ со-

ставляет не менее 5 % по сравнению с традиционным сжиганием угольной пыли. Существенное снижение теплофизических параметров при балластировании потока топлива может поставить процесс сжигания ВУТ на границу воспламенения и потребовать добавки топлива с высокой теплотой сгорания, а снижение теплоэнергетических показателей может оказаться экономически невыгодным [14].

В рамках снижения экологической нагрузки на среду обитания предлагаются также [11] использовать рециркуляцию продуктов сгорания при различных схемах ввода. При вводе в топливо учитывается изменение энтальпии согласно (12), при вводе в воздухопровод, в щлицы под горелками и в кольцевой канал вокруг горелки изменяются множители в соотношениях (4)–(7). Таким же образом учитывается изменение температуры горячего воздуха через расчет измененной энтальпии согласно (12). Представляется рациональным применить системный метод [15, 16] для комплексной оценки всех результатов применения энергетических топлив с повышенным содержанием балласта.

### Выводы

Поэтапное рассмотрение влияния балласта на теплофизические характеристики процесса горения энергетических топлив свидетельствует о существенном влиянии балласта на температуру горения, степень черноты ПС и на потоки собственного излучения от факельного континуума. Полученные в результате анализа математические зависимости позволяют производить оценку степени тепловой депрессии, выражающейся в снижении теоретической температуры и изменения потока собственного излучения.

### Литература

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

2. Осинцев, К.В. Расчет теплообмена в топке котельного агрегата: учеб. пособие / К.В. Осинцев, Е.В. Торопов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – 179 с.
3. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск, УралВТИ, 2004. – 304 с.
4. 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.
5. Теплоэнергетика и теплотехника: справ. Кн. 3: Тепловые и атомные электрические станции / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 647 с.
6. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
7. Торопов, Е.В. Факельные процессы с позиций теории вероятностей / Е.В. Торопов, Л.Е. Лымбина, Ю.Г. Ярошенко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2017. – № 8. – С. 662–669. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-662-669
8. Торопов, Е.В. Концепция факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 5–10. DOI: 10.14529/power150301
9. Торопов, Е.В. Основные характеристики факельного континуума в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 14–22. DOI: 10.14529/power160202
10. 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
11. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: учеб. для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 336 с.
12. Технологическое сжигание и использование топлива / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, Ю.М. Голдобин, Г.П. Ясников. – М.: Теплотехник, 2005. – 288 с.
13. 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/power170101
14. Блох, А.А. Теплообмен в топках паровых котлов / А.А. Блох. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние. 1984. – 240 с.
15. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спириин, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 520 с.
16. Tоропов, E.V. The Systemically Structured Adaptation of a Heat Transfer in Boilers / E.V. Tоропов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 19–23. DOI: 10.14529/power160103

**Лымбина Людмила Ефимовна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; lymbinale@susu.ru.

Поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.

DOI: 10.14529/power190201

## HOW BALLAST AFFECTS THE HEAT TRANSFER IN THE INTENSE COMBUSTION ZONE OF BOILERS

**L.E. Lymbina**, lymbinale@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper reviews the process of preparing and feeding the combustibles in the context of how combustion occurs in the furnaces of boiler units; the review helps define the requirements to the fuel flow and composition. At various steps, the fuel flow is mixed with excess air and ballast water, which affects heat transfer and combustion processes occurring in the boiler. The role of ballast is analyzed in two steps: first the paper finds how excess air affects the flow and the radiation properties of the products resultant from the combustion of fuels of three different compositions. Then the paper calculates the combined effects of excess air and ballast water on the eigen-radiation flux in the combustion of coal, sulfuric fuel oil, natural and industrial gases. Estimates use the fundamental coefficients of conservation laws as well as the reference data on the properties of

the considered fuels. Analysis has found the complex reduction in gas temperature which we herein refer to as the coefficient of thermal depression. Given that coefficient, the paper presents the eigen-radiation fluxes for four model fuels and discusses the applicability of research results.

*Keywords:* energy fuel, boiler unit, ballast, coefficient of thermal depression, radiation heat exchange.

### References

1. Kuznetsov N.V., Mitor V.V., Dubrovsky I.E., Karasina E.S. *Teplovoy raschet kotelnykh agregatov. Normativnyy metod.* [Thermal Calculation of Boiler Units. Standard Method]. 2nd ed. Minsk, EKOLIT Publ., 2011. 296 p.
2. Osintsev, K.V. Toropov E.V. *Raschet teploobmena v topke kotel'nogo agregata* [Calculation of Heat Transfer in the Furnace of the Boiler Unit]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2010. 179 p. (in Russ.)
3. Bogomolov V.V., Artemyev N.V., Alekhovich 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.
4. Telegin A.S., Shvydki V.S., Jaroshenko Yu.G. *Tplomassoperenos.* [Heat and Mass Transfer]. 2nd ed. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 455 p.
5. Klimentenko A.V., Zorin V.M. (Ed.) *Teploenergetika i teplotekhnika. Kniga 3: Teplovyie i atomnyie elektricheskie stantsii: spravochnik* [Heat Power Engineering and Heat Engineering. Book 3: Thermal and Nuclear Power Plants. Handbook]. Moscow, MPEI Publishing House, 2007. 647 p.
6. Babiy V.I., Kuvaev Y.F. *Gorenie ugol'noj pyli i raschet pyleugol'nogo fakela* [Burning of Coal Dust and Calculation of a Coal-Dust Torch]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
7. Toropov, E.V., Lymbina L.E., Yaroshenko Yu.G. [Flame Processes from Positions of Probability Theory]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 8, pp. 662–669. (in Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-662-669.
8. Toropov E.V., Osintsev K.V. The Concept of the Flame Continuum for Zone of Intense Burning of Boiler Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 5–10. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150301
9. Toropov E.V., Osintsev K.V. Main Characteristics of Flame Continuum within Active Combustion Area of Boiler Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 14–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160202
10. 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
11. Roslyakov P.V. *Metodyi zaschityi okruzhayushey sredy* [Methods of Environmental Protection]. Moscow, MPEI Publishing House, 2007. 336 p.
12. Vintovkin A.A., Ladygichev M.G., Goldobin Yu.M., Yasnikov G.P. *Tekhnologicheskoe szhiganie i ispol'zovanie topliva* [Technological Combustion and Fuel Use]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2005. 288 p.
13. Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical Model of Generalized Heat Transfer Inside Boiler Unit Furnace – Heat Exchange Paradigm. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170101
14. Bloch, A.A. *Teploobmen v topkakh parovykh kotlov.* [Heat Exchange in Furnaces of Steam Boilers]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p.
15. Shvydki V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. *Elementy teorii sistem i chislennyye metody 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.
16. Toropov E.V. The Systemically Structured Adaptation of a Heat Transfer in Boilers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 19–23. DOI: 10.14529/power160103

Received 19 February 2019

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лымбина, Л.Е. Влияние балласта на эффективность теплообмена в зоне интенсивного горения котельных агрегатов / Л.Е. Лымбина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.14529/power190201

### FOR CITATION

Lymbina L.E. How Ballast Affects the Heat Transfer in the Intense Combustion Zone of Boilers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190201