

Второе – замена существующей футеровки. При замене футеровки применили «мокрый войлок» ВРП-300 производства ООО «Волокнистые огнеупоры» [5], который выпускается в виде рулонов различной длины и ширины с толщиной до 250 мм и предельной температурой применения до 1350 °С.

Для аналитического обоснования предлагаемых мероприятий по улучшению тепловой работы газовой тигельной печи расчеты теплового баланса и теплотехнических показателей произведены с учетом подогрева воздуха до 500 °С и замены футеровки на волокнистую ВРП-300 толщиной 250 мм.

Составленный тепловой баланс печи показывает, что в результате произведенных конструктивных изменений снижается на 60 % расход газа и расчетный КПД печи повышается до 22,39 %, значительно падают потери теплоты через футеровку (суммарно до 10,78 %), при этом температура наружных стенок составляет 70 °С.

### Список использованных источников

1. Официальный сайт Kromschroeder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kromschroeder.de> (дата обращения: 25.11.2016).
2. Официальный сайт Weishaupt [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.weishaupt-corp.com> (дата обращения: 25.11.2016).
3. Футеровочные материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unifrax.eu.com> (дата обращения: 25.11.2016).
4. Барташ, М.Р. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах [Текст] / Барташ М.Р., Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Попов А.Б., Хамматов И.М. // Сталь. – 2010 г. – № 3. – С. 125-127.
5. Волокнистые огнеупоры: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mastermvo.ru> обращения: 19.07.2016).

УДК621.18

**Е. В. Торопов, К. В. Осинцев, А. В. Хасанова**

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

## АДАПТАЦИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ТОПОК ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

### Аннотация

*В статье рассмотрено дифференциальное уравнение энергии, адаптированное под условия топки котельного агрегата. Сформулировано обобщенное уравнение сохранения энергии, которое представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных допускающее решение методом разделения переменных. Рассмотрена схема пересечения векторов отраженной от криволинейной поверхности лучистой энергии и падающего потока радиации.*

*Ключевые слова: топка, уравнение энергии, теплообмен, температурное поле.*

### Abstract

*The paper considers the differential energy equation adapted to the conditions of the furnace of the boiler unit. A generalized energy conservation equation is formulated, which is a partial differential equation of the second order that admits a solution by the method of separation of variables. The scheme of intersection of the vectors of radiant energy reflected from the curvilinear surface and the incident radiation flux is considered.*

*Keywords: Furnace, energy equation, heat exchange, temperature field.*

### Введение

На сегодняшний день основные тенденции развития теплотехнической техники ориентированы на повышение маневренности, надежности и мощности тепловых агрегатов (ТА) при переменных характеристиках топлива. Таким образом, значительная часть проблем прямо или косвенно связана с аэромеханикой и теплообменом в топке. Одним из возможных вариантов решения некоторых вопросов, можно полагать, может базироваться на основе анализа дифференциального уравнения энергии и адаптации его к условиям топочных процессов ТА, а также детальном анализе конфигурации температурного поля топки в радиационном пограничном слое.

### Постановка и рассмотрение задачи

Рассмотрим плоское двумерное течение ( $W_z=0$ ), где координата  $x$  направлена вдоль потока среды, а координата  $y$  – поперек течения, причем  $y = 0$  на стенке КА, и введем безразмерные величины в уравнение энергии [1]:

$$W_x \frac{\partial \theta}{\partial X} + W_y \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pe} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) - \frac{1}{Bo} \left( \frac{\partial \langle q \rangle_{u,x}}{\partial X} + \frac{\partial \langle q \rangle_{u,y}}{\partial Y} \right) + \frac{Po}{Pe}. \quad (1)$$

Для условий теплообмена в топке ТА числа подобия, входящие в уравнение (1), имеют следующее теплофизическое содержание. Число Померанцева  $Po = q_v l_0^2 / \lambda T_0$  характеризует безразмерную плотность тепловыделений. Число Пекле  $Pe = Re \times Pr$  характеризует относительный вклад в формирование температурного поля потока среды в топке ТА конвективно-механизма переноса теплоты по сравнению с теплопроводностью. Число Больцмана  $Bo = (\rho w)_0 c_p / \sigma T_0^3$  описывает соотношение потоков энергии конвективного и радиационного характера, а величина  $1/Bo$  – участие радиационного механизма в формировании температурного поля потока среды в топке. Роль числа  $Bo$  в радиационно-конвективном теплообмене аналогична роли числа  $Pe$  при кондуктивно-конвективном теплообмене: когда число  $Pe$  мало, можно пренебречь переносом тепла конвекцией по сравнению с переносом тепла теплопроводностью. Когда число  $Bo$  имеет малую величину, можно пренебречь вкладом конвекции в формирование температурного поля потока среды по сравнению с излучением. Число  $Bo$  легко преобразуется в комплекс чисел подобия  $Bo = (Re / N)(Pr / Bu)$ , где, кроме отмеченных  $Re$  и  $Pr$ , приведены числа  $N = \sigma_0 T^3 / \lambda k$  и Бугера  $Bu = kl_0$ , где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>2</sup>/К<sup>4</sup> – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $k$  – средний по объему топки коэффициент ослабления топочной среды, м<sup>-1</sup>. Число  $N$  является радиационно-кондуктивным параметром, число  $Bu$  характеризует излучательную способность топочной среды КА.

Приведённая зависимость для числа  $Bo$  является определением, получить из неё расчетные зависимости можно только после установления количественных связей между величинами  $N$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Bu$ ,  $Po$  – аналитически, численно или экспериментально.

Закон сохранения энергии в виде баланса тепловых потоков для объема топочной среды  $V$  при переходе от всего объема теплового агрегата для условий стационарного во времени теплового режима можно записать в форме

$$\text{div} \vec{q}_k + \text{div} \vec{q}_T + \text{div} \vec{q}_l = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении:  $\vec{q}_k = \vec{w} \rho c_p T_{об}$  – вектор конвективного переноса энтальпии топочной среды, Вт/м<sup>2</sup>;  $\vec{q}_T = -\lambda_T \nabla T_{об}$  – вектор диффузионного переноса энергии теплопроводными турбулентными и молекулярными механизмами;  $\vec{q}_l = -\lambda_l \nabla T_{об}$  – вектор диффузионного лучевого (радиационного) переноса энергии топочной среды, Вт/м<sup>2</sup>. Коэффициентами теплопроводного и лучевого переноса являются  $\lambda_T = \lambda_{mol} + \lambda_{турб}$ , Вт/м·К, и  $\lambda_l = 16 \sigma_0 T^3 / 3k_{cp}$ , Вт/м·К.

Перенос теплоты также возможен совместно с переносом массы вещества в условиях температурного градиента  $\nabla T_{об}$  с коэффициентом переноса  $D\rho c_p \equiv \lambda_m$ , Вт/мК, при этом плотность теплового потока составит  $\vec{q}_m = -\lambda_m \nabla T_{об}$ , Вт/м<sup>2</sup>,  $D$  – коэффициент массовой диффузии, м<sup>2</sup>/с. Это позволяет все диффузионные механизмы объединить с помощью равенства  $\lambda_{об} = \lambda_{мол} + \lambda_{турб} + \lambda_l + \lambda_m$ , тогда  $\vec{q}_{об} = -\lambda_{об} \nabla T_{об}$  [2].

Первое слагаемое уравнения (2) характеризует дисперсионный механизм прихода энергии в объем  $V$ , второе и третье относятся к диссипативным механизмам, связанным с потерями энергии, что и отражено знаками минус. Поступление энергии в основной объем топки с конвективным потоком из зоны интенсивного горения происходит с температурой  $T_n$ , скоростью  $w_x$  и степенью химического недожога  $\xi$ . Начальная температура связана с коэффициентом сохранения теплоты в зоне интенсивного горения  $\varphi_{ЗИГ}$  и может быть определена по зависимости  $T_n = \varphi_{ЗИГ} T_{ад}$ , где  $T_{ад}$  – адиабатическая температура горения, определяемая по теплоте сгорания топлива и дополнительному внешнему поступлению теплоты с компонентами горения. Коэффициент  $\varphi_{ЗИГ}$  определяется расчетом теплообмена в зоне согласно [3]; степень химического недожога  $\xi$  можно определить по методике [4].

Таким образом, с учетом принятых уточнений уравнение энергии (2) преобразуется к виду

$$\rho c_p \bar{w} \nabla T_{об} - \text{div}(\lambda_{об} \nabla T_{об} + \rho c_p D \nabla T_{об}) = 0. \quad (3)$$

Далее, при делении на  $\rho c_p$ , замене  $\bar{w}$  на  $w_x$  и введении относительной температуры  $\theta = T_{об} - T_{СТ}$ , где  $T_{СТ}$  – температура тепловоспринимающих поверхностей в этой части топки, возможен переход к каноническому виду дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{w_x}{a_{об}} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

В уравнении (3)  $a_{об} \equiv \lambda_{об} / \rho c_p$  – обобщенный коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с. Кроме того, принято, что изменение температуры вдоль координаты  $y$  связано только с градиентно-диссипативным вторым слагаемым в (4), а изменение  $T_{об}$  вдоль координаты  $x$  связано только с конвективно-дисперсионным слагаемым в (3).

Изложенная выше методика формирования уравнения энергии допускает расширенное применение в виде включения других источников или стоков энергии в потоке топочной среды. Главным критерием отнесения дополнительных источников к конвективно-дисперсионной или градиентно-диссипативной части уравнения (3) является не знак источника (плюс или минус), а форма его участия в уравнении (3) – с  $grad T_{об}$  или  $div grad T_{об}$ . Аддитивная форма уравнения энергии также позволяет учесть подачу потока газов рециркуляции путём разделения всей длины канала топки на участки, причем выходные из первого участка параметры являются входными для второго с учетом материального и теплового баланса места ввода.

Обычно применяется плоское температурное поле на границе основного потока ба топки ТА и тепловоспринимающей стенки, но известно, что образование шлакующих частиц и их адгезия, а также образование экологически вредных выбросов в значительной степени зависят от формы температурного поля у стенки ТА. Лучистый тепловой поток из топки создает в направлении осей  $x$  и  $y$  изотермическое поле, для описания которого рационально применить градиентную форму, аналогичную закону Фурье  $q_p = -\lambda_p g \text{tad} T$ , или для двумерного поля  $q_p = -\lambda_p \partial T / \partial y$ , аналогичную форму описания эффективного потока от поверхности экранов можно принять для отраженного и собственного излучения от экранов.

Рассмотрим схему распределения векторов потока эффективного излучения, собственного излучения и радиации на схеме

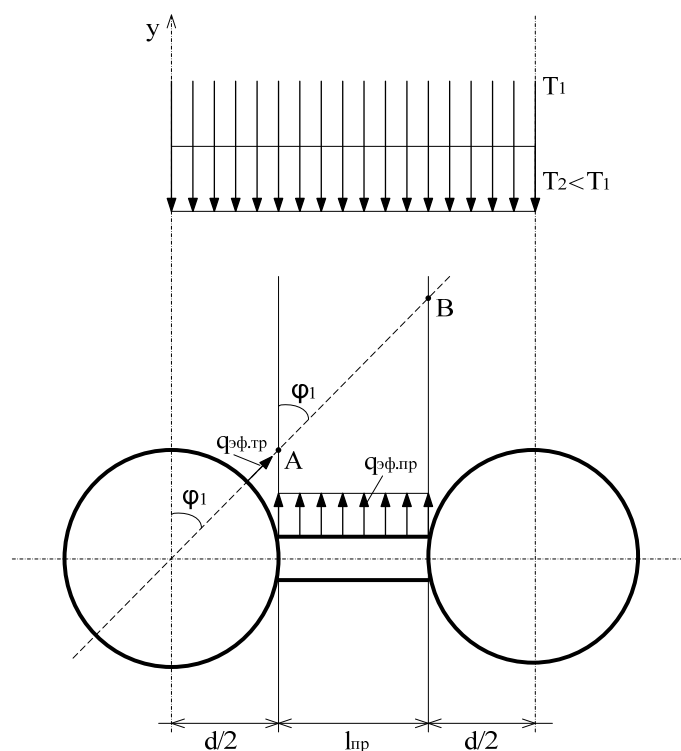


Рис. 1. Схема пересечения  $q_{эф.тр}$ ,  $q_{эф.пр}$ ,  $q_{л}$

Встречный поток эффективного излучения от экрана равен сумме векторов отраженного и собственного излучений и направлен навстречу  $q_{р}$  с углом между ними  $\varphi$ , который изменяется с перемещением расчетной точки А. Это обстоятельство изменяет конфигурацию температурного поля топки в радиационном пограничном слое, что отражается на процессах шлакования поверхностей экранов и образовании оксидов азота и углерода.

#### Закключение

Проведя предварительный анализ распределения и пересечения потоков эффективного, отраженного излучения с лучистым тепловым потоком, можно предположить, что геометрия радиационного пограничного слоя зависит от формы стенки, и может быть уточнена для экранов КА.

#### Список использованных источников

1. Торопов Е.В. Адаптация дифференциального уравнения энергии к условиям топочных процессов в котельных агрегатах / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15. №1. – С. 5-10.
2. 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.
3. 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.
4. Торопов Е.В. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15. №4. – С. 19-25.