

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ЗОНЕ ИНТЕНСИВНОГО ГОРЕНИЯ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

**Е.В. Торопов, К.В. Осинцев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Сформулированы условия декомпозиции зоны интенсивного горения (ЗИГ) на три компонента – топочный газ, факельный континуум и твердое ограждение – и определены их границы. Разработана схема тепловых потоков и определены их параметры и характеристики с целью определения результирующего теплового потока на факельный континуум. Определены три режима радиационного теплообмена в ЗИГ: равномерно распределенный и направленные (прямой и косвенный), сформулированы условия их существования и основные особенности.

*Ключевые слова:* топка, зона интенсивного горения, радиационный теплообмен, компоненты схемы, режимы теплообмена.

## Введение

При определении лучистого теплового потока на формирующийся факел в зоне интенсивного горения (ЗИГ) необходимо сформулировать ряд адаптирующих условий, которые бы позволили рассмотреть вопрос в интегральной постановке [1]. Первое условие касается разбивки ЗИГ на индивидуальные участки с характерными условиями радиационного теплообмена истекающей из амбразур топливно-воздушной среды. Рационально принять, что ЗИГ имеет форму параллелепипеда, ограниченного по периметру поверхностями ограждения, которые состоят из трубчатых поверхностей тепловосприятия в нижней зоне КА, покрытых шлаковыми отложениями с элементами теплоизолирующей обмазки. С применением зажигательного пояса поверхности ограждения ЗИГ образуют сплошную замкнутую поверхность, покрытую огнеупорной обмазкой и шлаковым гарнисажем.

## Постановка задачи

Поверхности ограждения в рамках серой модели характеризуются интегральной степенью черноты  $\varepsilon_{ог} = \text{const}$ , численное значение которой зависит от способа шлакоудаления, схемы расположения топливосжигающих устройств (ТСУ) в топочной камере, конструкции ограждения, наличия и конструкции зажигательного пояса и других факторов, которые можно учесть в соответствии с рекомендациями [2]. Так как поверхности ограждения имеют вогнутую форму, то наблюдается излучение этой поверхности самой на себя, ослабленной при прохождении через заполненное топочными газами пространство. Отнесение того или иного значения  $F_{ог}$ ,  $\text{м}^2$ , к рассчитываемому участку образующегося факела зависит от схемы расположения ТСУ, их числа и конструкции, но определенно можно отметить, что ТСУ крайнего расположения имеют по одной дополнительной поверхности ограждения, другие ТСУ имеют только две или одну при встречной компоновке

ТСУ. Этот вопрос достаточно подробно освещен в работе П.В. Рослякова [3], где проведено разделение поверхностей ограждения с целью получения среднего коэффициента тепловой эффективности экранов, причем газообразная среда в ЗИГ не разделена на факельную и топочную.

Виртуальные поверхности, разделяющие области соседних ТСУ, можно считать адиабатическими или теплоизолированными, через которые не происходит перенос лучистых тепловых потоков между областями соседних ТСУ, что отвечает представлению об изотропном поле температур и концентраций в объеме топочной среды ЗИГ. Сверху и снизу ЗИГ также ограничена виртуальными адиабатическими поверхностями с теми же граничными условиями. Причем это допущение в большей степени соответствует реальным условиям верхнего ограничения; нижнее ограничение требует дополнительного рассмотрения условий теплообмена. Принимается также, что излучающая топочная среда в рамках серой модели характеризуется интегральной степенью черноты  $\varepsilon_r = \text{const}$ , которую можно определить в соответствии с рекомендациями [4].

Схему тепловых потоков в рамках концепции факельного континуума в этом случае можно охарактеризовать следующим образом: тепловоспринимающая поверхность начального участка факела  $F_{ф}$  с абсолютной температурой  $T_{ф}$  и степенью черноты  $\varepsilon_{ф}$  окружена поверхностью ограждения  $F_{ог}$  с температурой  $T_{ог}$ , одинаковой во всех точках ограждения; степень черноты топочных газов  $\varepsilon_r$  по всем направлениям одинакова и определяется составом и температурой газов  $T_r$ . Тогда уравнения баланса радиационной теплоты на поверхности факела и ограждений при наличии газов, заполняющих свободный объем, имеют вид:

$$q_{ф} F_{ф} = q_r^{\phi} F_{ф} + Q_{ог} (1 - \varepsilon_r) \varphi_{ог,ф} - Q_{ф}, \quad (1)$$

$$q_{ог} F_{ог} = q_r^{ог} F_{ог} + Q_{ф} (1 - \varepsilon_r) + Q_{вз,ог} - Q_{ог}. \quad (2)$$

Здесь  $q_\phi$  и  $q_{ог}$  – плотность результирующих потоков на поверхности факела и ограждения, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_\Gamma^\phi$  и  $q_\Gamma^{ог}$  – плотность излучения газа на 1 м<sup>2</sup> поверхности факела и ограждения, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_\phi$ ,  $Q_{ог}$ ,  $Q_{вз.ог}$  – полное излучение факела, ограждения и ограждения самого на себя (самооблучение), Вт. При определении  $Q_{ог}$  из второго соотношения и подстановке этой величины в первое получаем после некоторых простых преобразований плотность результирующего потока на поверхность факела

$$q_\phi = q_\Gamma^\phi + (1 - \varepsilon_\Gamma) q_\Gamma^{ог} + \frac{Q_\phi}{F_\phi} \left[ (1 - \varepsilon_\Gamma)^2 \frac{F_\phi}{F_{ог}} - 1 \right] + (1 - \varepsilon_\Gamma) \left[ \frac{Q_{вз.ог}}{F_{ог}} - q_{ог} \right]. \quad (3)$$

Из полученного уравнения следует, что плотность результирующего потока излучения на факел  $q_\phi$  при постоянных значениях  $T_\phi$ ,  $q_{ог}$  и при степени черноты поверхности факела, приближающейся к единице, что впоследствии будет уточнено, зависит, в основном, от четырех факторов:

- излучения топочных газов на поверхность факела  $q_\Gamma^\phi$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- излучения топочных газов на поверхность ограждения  $q_\Gamma^{ог}$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- степени черноты топочных газов  $\varepsilon_\Gamma$ ;
- углового коэффициента излучения ограждения на факел  $\varphi_{ог.ф} = F_\phi / F_{ог}$ .

По соотношению плотности теплового потока от основного источника излучения – топочных газов – можно выделить три условных режима. Когда плотность теплового потока от топочных газов распределяется равномерно в направлении факела и ограждения  $q_\Gamma^\phi \approx q_\Gamma^{ог}$ , можно говорить о равномерно распределенном режиме радиационного теплообмена. Если создается режим, при котором плотность теплового потока на факел превышает плотность потока на ограждение, можно применить определение – прямой направленный режим теплообмена  $q_\Gamma^\phi > q_\Gamma^{ог}$ ; в случае обратного соотношения плотностей тепловых потоков  $q_\Gamma^\phi < q_\Gamma^{ог}$  применяется определение направленного косвенного режима.

### Равномерно распределенный режим радиационного теплообмена

Этому режиму более всего соответствуют условия, когда температура излучающего газа и его степень черноты однородны по всему объему рассматриваемой области. Задача состоит в определении влияния степени черноты топочной среды  $\varepsilon_\Gamma$  и углового коэффициента  $\varphi_{ог.ф}$  на интенсивность теплообмена. Собственное излучение основного источника радиации – топочной среды – определяется из закона Стефана – Больцмана при коэффициенте излучения топочных газов  $\sigma_\Gamma = \sigma_0 \varepsilon_\Gamma$ , где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>, излучение на факел

$$q_\Gamma^\phi F_\phi = \sigma_\Gamma F_\phi T_\Gamma^4, \quad (4)$$

излучение на ограждение

$$Q_{рез.ог} = q_{ог} F_{ог}. \quad (5)$$

На поверхность ограждения также падает часть прошедшего через слой газа эффективного потока излучения факела  $q_\phi^{ог} = Q_\phi (1 - \varepsilon_\Gamma)$ .

Так как ограждение имеет вогнутую форму, то происходит излучение этой поверхности самой на себя, ослабленное при прохождении потока через топочную среду,

$$Q_{вз.ог} = Q_{ог} \varphi_{ог.ог} (1 - \varepsilon_\Gamma) = \left[ \sigma_\Gamma F_{ог} T_{ог}^4 + Q_\Gamma^{ог} F_{ог} (1 - \varepsilon_{ог}) + Q_\phi^{ог} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_{ог}) \right] \times (1 - \varphi_{ог.ф}) (1 - \varepsilon_\Gamma). \quad (6)$$

В квадратные скобки выражения (6) входит собственное излучение ограждения и излучения газовой среды и факела, отраженные ограждением. Внутренняя поверхность ограждения, кроме того, расходует теплоту на нагрев водопаровой среды в экранных трубах и на потери теплоты теплопроводностью через обмуровку КА; этот тепловой поток можно определить в терминах радиационной теплоотдачи как результирующий тепловой поток на поверхность ограждения

$$Q_{рез.ог} = q_{ог} F_{ог}. \quad (7)$$

При подстановке полученных выражений в формулу (5) для баланса теплоты на поверхности ограждения можно преобразовать эту формулу для определения полного потока излучения на поверхности ограждения

$$Q_{ог} = \frac{\sigma_\Gamma F_{ог} T_\Gamma^4 + Q_\phi (1 - \varepsilon_\Gamma) - q_{ог} F_{ог}}{1 - (1 - \varphi_{ог.ф}) (1 - \varepsilon_\Gamma)}. \quad (8)$$

Аналогично определяются величины, входящие в уравнение (4). Собственное излучение газов на поверхность факела

$$q_\Gamma^\phi F_\phi = \sigma_\Gamma F_\phi T_\Gamma^4, \quad (9)$$

излучение ограждения на факел, ослабленное поглощением топочных газов,

$$Q_\phi^{ог} = Q_{ог} (1 - \varepsilon_\Gamma) \varphi_{ог.ф}. \quad (10)$$

Так как поверхность факела невогнутая, то самоизлучение отдельных участков факела исключено, и эффективное излучение поверхности факела складывается из собственного и отраженных потоков излучения газов и ограждения

$$Q_\phi = \sigma_\phi F_\phi T_\phi^4 + \sigma_\Gamma F_\phi T_\Gamma^4 (1 - \varepsilon_\phi) + Q_{ог} (1 - \varepsilon_\Gamma) (1 - \varepsilon_\phi) \varphi_{ог.ф}. \quad (11)$$

После подстановки полученных соотношений в уравнение (3) для баланса теплоты на поверхности факела и ряда преобразований получается уравнение для результирующего потока на поверхности факела  $Q_\phi^{рез} = q_\phi^{рез} F_\phi$

$$Q_{\phi}^{\text{рез}} = \sigma_{\Gamma} F_{\phi} \varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4 + Q_{\text{ог}} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \varphi_{\text{ог.}\phi} \varepsilon_{\phi} - \sigma_{\phi} F_{\phi} T_{\phi}^4, \quad (12)$$

которое решается при определении  $Q_{\text{ог}}$  через подстановку в (9)  $Q_{\phi}$  из (11)

$$Q_{\phi}^{\text{рез}} = C_{\Gamma.\text{ог.}\phi} F_{\phi} \left[ \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 \right], \quad (13)$$

где приведенный коэффициент излучения в системе из трех серых тел «топочные газы – ограждение – факел»

$$C_{\Gamma.\text{ог.}\phi} = C_0 \varepsilon_{\Gamma} \varepsilon_{\phi} \times \frac{1 + \varphi_{\text{ог.}\phi} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) - \frac{(q_{\text{ог}} - q_{\text{вз.ог}})(1 - \varepsilon_{\Gamma})}{C_0 \varepsilon_{\Gamma}} \cdot \frac{F_{\phi}}{\left[ \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{ог}}}}{\varphi_{\text{ог.}\phi} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \left[ \varepsilon_{\phi} + \varepsilon_{\Gamma} (1 - \varepsilon_{\phi}) \right] + \varepsilon_{\Gamma}}. \quad (14)$$

Величина  $C_{\Gamma.\text{ог.}\phi} \equiv C_{\text{пр}}$  представляет собой приведенный коэффициент излучения в системе «топочные газы – ограждение – факел» с применением концепции факельного континуума и с учетом роли ограждения в процессах лучистого теплообмена. Этот фактор зависит от степени черноты топочных газов  $\varepsilon_{\Gamma}$  и отношения площади поверхности факела к площади поверхности ограждения  $F_{\phi}/F_{\text{ог}} = \varphi_{\text{ог.}\phi}$ , а также от степени черноты той части потока, которая относится к факельному континууму  $\varepsilon_{\phi}$ . При выводе формул (13)–(14) было принято, что  $\varepsilon_{\Gamma}$  и  $F_{\text{ог}}$  не зависят друг от друга; уточнить анализ можно при учете увеличения оптической толщины слоя топочных газов при увеличении площади поверхности ограждения, но в рамках поставленной задачи это уточнение можно провести позднее. Более того, площадь поверхности ограждения является в большей степени конструктивным параметром, который принимается постоянным при анализе радиационного теплообмена в ЗИГ.

Плотность результирующего потока через ограждение  $q_{\text{ог}}$  характеризует ту часть теплового потока, которая расходуется на нагрев пароводяной среды в экранных поверхностях ЗИГ и отражает потери теплоты в окружающую среду. Эта величина связана с коэффициентом эффективности экранов ЗИГ, который можно определить по нормативной методике [2], разделив полученную величину  $\psi_3$  на коэффициент сохранения теплоты  $\phi$ :  $q_{\text{ог}} \approx \psi_3 / \phi$ . Величина  $q_{\text{вз.ог}}$  характеризует теплоту, возвращенную в ЗИГ конвективными потоками от поверхности ограждения.

Для дальнейшего анализа и адаптации полученной зависимости (13) к условиям ЗИГ рационально несколько преобразовать эту зависимость, разделив радиационную и конвективную компоненты, что без учета промежуточных выкладок дает

$$Q_{\phi}^{\text{рез}} = \frac{\varepsilon_{\phi} F_{\phi} \left[ \frac{F_{\phi}}{F_{\text{ог}}} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) + 1 \right] \sigma_0 \varepsilon_{\Gamma} (T_{\Gamma}^4 - T_{\phi}^4)}{\frac{F_{\phi}}{F_{\text{ог}}} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \left[ \varepsilon_{\phi} + \varepsilon_{\Gamma} (1 - \varepsilon_{\phi}) \right] + \varepsilon_{\Gamma}} - \frac{(q_{\text{ог}} - q_{\text{вз.ог}})(1 - \varepsilon_{\Gamma}) F_{\text{ог}} / F_{\phi}}{\frac{F_{\phi}}{F_{\text{ог}}} (1 - \varepsilon_{\Gamma}) \left[ \varepsilon_{\phi} + \varepsilon_{\Gamma} (1 - \varepsilon_{\phi}) \right] + \varepsilon_{\Gamma}}. \quad (15)$$

Для увеличения потока результирующего излучения на факельную среду главное значение имеет повышение температуры топочной среды  $T_{\Gamma}$ , вторым по значению фактором является степень черноты топочной среды  $\varepsilon_{\Gamma}$ , влияние которого особенно сильно сказывается при малых значениях  $\varepsilon_{\Gamma}$  вплоть до  $\varepsilon_{\Gamma} = 0,40$ . Третьим фактором является отношение площади поверхности факела и ограждения, но это влияние зависит также от степени черноты топочной среды. При низких значениях  $\varepsilon_{\Gamma}$  увеличение поверхности ограждения  $F_{\text{ог}}$ , а значит, снижение  $F_{\phi}/F_{\text{ог}}$  от 0,7 до 0,1, приводит к двукратному увеличению приведенного коэффициента излучения, при высоких значениях  $\varepsilon_{\Gamma} \approx 0,6$  это же изменение поверхностей приводит к увеличению приведенного коэффициента излучения лишь на 12,5 %.

Температура поверхности ограждения  $T_{\text{ог}}$ , хотя и не входит в итоговую формулу (15), тем не менее отражает роль ограждения как передатчика теплоты от топочных газов к факелу и изменяется в интервале от  $T_{\Gamma}$  до  $T_{\phi}$ . При  $\varepsilon_{\Gamma} \rightarrow 0$   $T_{\text{ог}} \rightarrow T_{\phi}$ , при  $\varepsilon_{\Gamma} \rightarrow 1,0$   $T_{\text{ог}} \rightarrow T_{\Gamma}$ , при промежуточных значениях  $\varepsilon_{\Gamma}$  величина  $T_{\text{ог}}$  зависит также от отношения площади поверхностей  $F_{\phi}/F_{\text{ог}}$ .

Плотность результирующего теплового потока излучением на поверхность ограждения  $q_{\text{ог}}$  можно определить как разность падающего  $q_{\text{пад}}$  и отраженного  $q_{\text{отр}}$  потоков, деленную на  $q_{\text{пад}}$ :  $q_{\text{ог}} = q_{\text{пад}} / (q_{\text{пад}} - q_{\text{отр}})$ . В практике тепловых расчетов результирующего потока излучения на экранную поверхность применяется коэффициент эффективности экранов  $\psi_3$ , который характеризует долю потока теплоты, переданной пароводяной среде в экранных трубах. Этот коэффициент определяется через угловой коэффициент экранов  $\chi$ , умноженный на коэффициент  $\zeta$ , учитывающий термическое сопротивление шлаковых отложений на экранных трубах или изоляционного слоя закрытых экранов. С учетом того, что результирующий тепловой поток включает не только теплоту, переданную рабочей среде в трубах, но и тепловые потери в окружающую среду, можно принять, что  $q_{\text{ог}} = q_{\text{пад}} \chi \zeta / (1 - \phi_{\text{п}})$ , где коэффициент сохранения теплоты  $\phi$  определяется  $\phi_{\text{п}} = 1 - q_5 / (q_5 + \eta_{\text{КА}})$  через потери теплоты от наружного охлаждения  $q_5$  и КПД КА  $\eta_{\text{КА}}$ .

Но разработанная методика и полученные зависимости позволяют подойти к решению вопроса о той части зависимости, которая отражает потери

из ЗИГ. Так как теплота, возвращенная в зону интенсивного горения конвективным механизмом, отражена в температурном факторе излучающих топочных газов, то рационально считать потерями из ЗИГ только ту часть теплового потока на ограждение, которая реально теряется через ограждение в окружающее КА пространство. Это позволяет вместо отрицательного слагаемого ввести в первое слагаемое правой части (15) коэффициент потерь  $\varphi_n$ , который определяется через коэффициент сохранения теплоты  $\varphi_n \approx 0,95$ .

В этом случае зависимость для результирующего теплового потока излучением на поверхность факельного континуума существенно упрощается

$$Q_{\phi}^{\text{рез}} = C_{г.ог.ф} (\theta_r^4 - \theta_{\phi}^4) F_{\phi}, \quad (16)$$

где  $\theta = T/100$ ; приведенный коэффициент излучения с учетом потерь определяется по зависимости

$$C_{г.ог.ф} = \frac{C_0 \varphi_n \varepsilon_r \varepsilon_{\phi} [\varphi_{ог.ф} (1 - \varepsilon_r) + 1]}{\varphi_{ог.ф} (1 - \varepsilon_r) [\varepsilon_{\phi} + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_{\phi})] + \varepsilon_r}. \quad (17)$$

Для проверки достоверности полученных зависимостей необходимо рассмотреть предельные значения факторов, входящих в уравнение (17). При допущении для степени черноты газовой среды абсолютно черного приближения  $\varepsilon_r = 1,0$ , что, строго говоря, невозможно достигнуть на практике, из (17) получаем  $C_{г.ог.ф} = C_0 \varphi_n \varepsilon_{\phi} = 5,67 \cdot 0,95 \cdot \varepsilon_{\phi}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Таким образом, предельные значения приведенного коэффициента излучения в системе из двух газообразных и одного твердого тела линейно зависят от степени черноты факела  $C_{г.ог.ф} = 5,3865 \varepsilon_{\phi}$ . Аналогичной непосредственной зависимости для  $\varepsilon_r$  найти не удастся, но тем не менее, по графикам (см. рисунок) ясно, что с увеличением  $\varepsilon_r$  растет  $C_{г.ог.ф}$ .

Зависимость для  $Q_{\phi}^{\text{рез}}$  допустимо применять

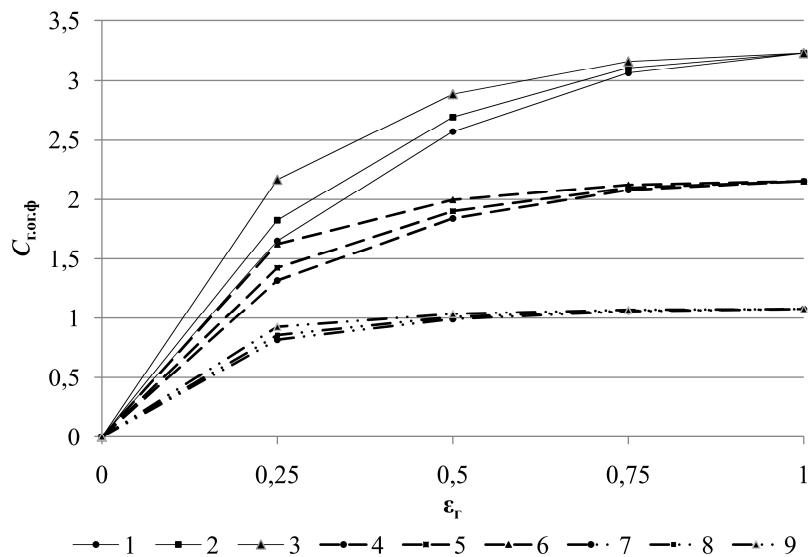
как в области нагрева факела, так и в области повышенных температур факела, это определяется разностью температур  $(\theta_r^4 - \theta_{\phi}^4)$ . При  $\theta_r > \theta_{\phi}$  происходит нагрев топливно-воздушной среды, то есть факельного континуума, до температуры воспламенения и далее до  $\theta_r = \theta_{\phi}$ , при этом результирующий тепловой поток положителен, то есть направлен от газовой среды к факелу. При  $\theta_{\phi} > \theta_r$  результирующий тепловой поток отрицателен, так как направлен от факела в топочную среду. Скорость нагрева в первой части процесса зависит, в основном, от тепловых процессов и теплофизических свойств элементов факельного континуума, что было рассмотрено ранее. Начало воспламенения зависит от тепловых процессов и «температуры воспламенения» элементов факельного континуума. Рост температуры на участке интенсивного горения зависит от фракционного состава угольной пыли, теплоотдачи от факела, состава факельной среды и некоторых других факторов. Согласно этим схематическим представлениям можно рассмотреть роль ограждения в теплообмене в зоне интенсивного горения. Эти термодинамические соотношения и выводы должны быть скорректированы с учетом балансовых соображений.

Определим полный тепловой поток от ограждения по формуле

$$Q_{ог} = C_0 \varepsilon_{ог} \theta_{ог}^4 F_{ог} = \frac{\varphi_n [C_0 \varepsilon_r \theta_r^4 F_{ог} + C_0 \varepsilon_{\phi} \theta_{\phi}^4 F_{\phi} (1 - \varepsilon_r)]}{1 - (1 - \varphi_{ог.ф})(1 - \varepsilon_r)}, \quad (18)$$

откуда

$$\frac{\varepsilon_{ог} \theta_{ог}^4}{\varphi_n} = \frac{\varepsilon_r \theta_r^4 - \varepsilon_{\phi} \theta_{\phi}^4 F_{\phi} / F_{ог}}{1 - (1 - F_{\phi} / F_{ог})(1 - \varepsilon_r)}. \quad (19)$$



**Зависимости  $C_{г.ог.ф} = f(\varepsilon_r)$  для различных угловых коэффициентов  $\varphi$  и значений степени черноты факела  $\varepsilon_{\phi}$ : 1 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,6$ ; 2 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,0$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,6$ ; 3 -  $\varphi_{ог.ф} = 0,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,6$ ; 4 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,4$ ; 5 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,0$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,4$ ; 6 -  $\varphi_{ог.ф} = 0,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,4$ ; 7 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,2$ ; 8 -  $\varphi_{ог.ф} = 1,0$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,2$ ; 9 -  $\varphi_{ог.ф} = 0,5$ ;  $\varepsilon_{\phi} = 0,2$**

С применением метода вспомогательных функций последнее соотношение можно привести к виду, удобному для анализа,

$$\Psi_{\text{ог}} = \frac{\varphi_{\text{п}} (\Psi_{\text{г}} - \Psi_{\text{ф}} \varphi_{\text{ог.ф}})}{\varphi_{\text{ог.ф}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varphi_{\text{ог.ф}})}. \quad (20)$$

Это соотношение, построенное с учетом закона сохранения энергии, уточняет условие перехода факельного континуума от роли поглотителя теплового потока к роли излучателя с позиции нейтрального ограждения. Это условие теперь выглядит так:  $\Psi_{\text{г}} = \Psi_{\text{ф}} \varphi_{\text{ог.ф}}$ . Вспомогательные функции в этих зависимостях  $\Psi = \varepsilon \theta^4$ , а знаменатель в зависимости от направления анализа можно переписать в эквивалентном виде:

$$\varphi_{\text{ог.ф}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varphi_{\text{ог.ф}}) = \varepsilon_{\text{г}} + \varphi_{\text{ог.ф}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}). \quad (21)$$

### Режимы направленного радиационного теплообмена

Выведенные здесь соотношения базируются на равномерно распределенном режиме радиационного теплообмена, когда во всем объеме ЗИГ топочная среда имеет однородную температуру и светимость, то есть  $\Psi_{\text{г}} = \text{const}$ . Но в зависимости от поставленной задачи может появиться требование о создании направленного прямого режима, когда в отдельной части топочной среды создаются условия для увеличения или уменьшения радиационного теплового потока. Возможен также вариант с косвенным направленным радиационным теплообменом, когда управляемый радиационный поток направляется на промежуточный элемент системы, так как на основной элемент по каким-либо причинам невозможно направлять управляемый поток. Полученные соотношения позволяют определить способы воздействия на тепловой поток.

Режим равномерно распределенного радиационного теплообмена может соответствовать процессам самовоспламенения топливно-воздушной смеси. Режим прямого направленного радиационного теплообмена может соответствовать закиганию раскаленными продуктами сгорания, режим косвенного направленного теплообмена может соответствовать воспламенению накаливаемыми телами, применяемыми в целях стабилизации процессов горения.

Для исследования влияния излучательной способности слоев топочного газа, примыкающего к поверхности факельного континуума  $\Psi_{\text{г}}''$  и заполняющего пространство между факелом и ограждением  $\Psi_{\text{г}}'$ , запишем плотность теплового потока, падающего на поверхность факельного континуума, в виде

$$q_{\text{пад}}^{\text{ф}} = \Psi_{\text{г}}'' + \Psi_{\text{г}}' (1 - \varepsilon_{\text{г}}'') + q_{\text{пад}}^{\text{ог}} \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}''), \quad (22)$$

где

$$q_{\text{пад}}^{\text{ог}} = \Psi_{\text{г}}' + \Psi_{\text{г}}'' (1 - \varepsilon_{\text{г}}') + \Psi_{\text{ф}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}''). \quad (23)$$

Таким образом,

$$q_{\text{пад}}^{\text{ф}} = \Psi_{\text{г}}'' [1 + \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'')] + \Psi_{\text{г}}' [(1 - \varepsilon_{\text{г}}'') + \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'')] + \Psi_{\text{ф}} \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}''). \quad (24)$$

Определив разность между  $q_{\text{пад}}^{\text{ф.н}}$  при прямом направленном режиме и  $q_{\text{пад}}^{\text{ф.р}}$  при распределенном режиме  $\Delta q_{\text{пад}}^{\text{ф}} = q_{\text{пад}}^{\text{ф.н}} - q_{\text{пад}}^{\text{ф.р}}$  и разделив ее на  $q_{\text{пад}}^{\text{ф.р}}$  при  $\Psi'' = \Psi'$ , получим результат от изменения режима теплообмена

$$\frac{\Delta q_{\text{пад}}^{\text{ф}}}{q_{\text{пад}}^{\text{ф.р}}} = \frac{(\Psi_{\text{г}}'' - \Psi_{\text{г}}') [1 + \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'')] + \Psi_{\text{ф}} \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'')}{\Psi_{\text{г}}' [(1 - \varepsilon_{\text{г}}'') + 2\varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'') + 1] + \Psi_{\text{ф}} \varphi_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}' - \varepsilon_{\text{г}}'')}. \quad (25)$$

Наиболее просто можно произвести адаптационную проверку достоверности полученных зависимостей для случая  $\varepsilon_{\text{г}}' = \varepsilon_{\text{г}}'' = \varepsilon_{\text{ф}} = 0,4$  при  $T_{\text{г}}' = 1500 \text{ К}$ ,  $T_{\text{г}}'' = 1700 \text{ К}$ ,  $T_{\text{ф}} = 1000 \text{ К}$ ,  $\varphi_{\text{п}} = 0,95$ ; подставив эти данные в зависимость (25), получим

$$\frac{\Delta q_{\text{пад}}^{\text{ф}}}{q_{\text{пад}}^{\text{ф.р}}} = \frac{39756 - 24097,5}{39756 + 16757,5} = 0,277. \quad \text{Таким образом,}$$

создание прямого направленного режима за счет повышения температуры излучающего слоя на 200 К приводит к увеличению плотности теплового потока на низкотемпературную часть факела в 1,277 раза. Принятие одинаковой степени черноты для всех трех газообразных элементов системы излучения должно выделить температурный фактор, это допущение несущественно для обычных расчетов, более точно  $\varepsilon_{\text{г}} = (p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}, l_{\text{ф}}, \theta)$  можно определить по методике [2].

Равномерно распределенному режиму теплообмена соответствует энергичная рециркуляция топочной среды, при этом топливо сгорает, как правило, в нескольких факелах, рециркуляция обеспечивается эжекцией топочной среды к факельному континууму. Чем больше число факелов, тем меньше их объем при заданной тепловой мощности и тем быстрее факелы теряют свою индивидуальность, растворяясь в атмосфере топочных газов. При этом и дожигание остатков горючего распределяется по объему зоны интенсивного горения, что способствует получению в ней равномерной температуры.

Этому режиму соответствует работа котельных агрегатов на высокорекреационных топливах, при переходе к низкорекреационным топливам необходимо увеличить плотность теплового потока на факел, что достигается установкой зажигательного пояса. При этом в рамках режима распределенного теплообмена увеличивается поверхность обмуровки, что можно учесть уменьшением отно-

шения  $F_{\phi}/F_{ог}$  и соответствующим увеличением приведенного коэффициента излучения, как отмечалось ранее.

Для создания режима равномерно распределенного радиационного теплообмена при достижении высокой интенсивности горения необходимо увеличивать объем топки для увеличения  $\epsilon_r$ , так как это увеличивает  $l_{эф}$ , но не всегда это достижимо по конструктивным соображениям. Также необходимо повышать температуру топочных газов, что ограничивается соотношениями по процессам горения, как было рассмотрено ранее. Поверхность нагрева, то есть тепловоспринимающая поверхность факела  $F_{\phi}$  также должна быть увеличена, что достигается дроблением факелов. В качестве практической рекомендации также следует принять применение дополнительных топлив, повышающих светимость факела – легкие фракции жидкого топлива и углеводородов, которые могут обеспечить эффективное сажевыделение.

Процесс теплообмена в ЗИГ соответствует режиму направленного косвенного радиационного теплообмена, когда плотность потоков от топочных газов на ограждение больше, чем на поверхность факельного континуума  $Q_r^{ог} > Q_r^{\phi}$ . При этом неравномерное распределение температуры и степени черноты газов организуется таким образом, чтобы зона максимальной излучательной способности располагалась ближе к поверхности ограждения, чем к факельной поверхности. Такое распределение излучательной способности газов позволяет создать «мягкий» режим нагрева для низкотемпературной части факела, что дает возможность управлять образованием оксидов азота.

Для эффективной реализации этого режима необходима либо высокая степень черноты ограждения для создания достаточно высокого потока переизлучения на факел, либо напротив близкая к нулю степень черноты ограждения, что дает возможность работать в «зеркальном» режиме. В первом случае ограждение работает в условиях высокой температуры, причем шлакование поверхности ограждения не сказывается на эффективности режима. Конструктивные решения такого типа хорошо известны – это всевозможные стабилизаторы воспламенения и «разбойники», устанавливаемые в низкотемпературной части факельного континуума. Требования к свойствам топочных

газов довольно противоречивы: в той части топки, где формируется тепловой поток на ограждение, газы должны обладать высокой излучательной способностью, а в той части, которая расположена на пути теплового потока к тепловоспринимающей поверхности факельного континуума, газы должны хорошо пропускать излучение, то есть обладать низкой степенью черноты. Сочетать эти свойства в условиях ограниченного пространства топки проблематично. «Зеркальный» режим в котельной технике практически не выполняется.

### Заключение

1. Достоверность разработанной математической модели теплообмена в ЗИГ базируется на фундаментальных законах теплопереноса и подтверждается адаптационными численными решениями для предельных условий.

2. Разделение процессов теплопереноса на три типа – при равномерно распределенных параметрах и при направленном управлении прямым и косвенным радиационными потоками значительно расширяет возможности применения математической модели.

3. Весь диапазон конструктивных и режимных условий теплообмена в ЗИГ сконцентрирован в графическом виде, что позволяет оперативно оценивать изменения в условиях теплообмена и управлять основными факторами эффективности котельного агрегата.

4. Применение трехкомпонентной модели теплообмена в ЗИГ увеличивает возможности управления тепловыми процессами в направлении повышения эффективности теплогенерации и топливоиспользования.

### Литература

1. Лыков, А.В. *Тепломассообмен: справ. / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.*
2. *Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 256 с.*
3. Росляков, П.В. *Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 336 с.*
4. Телегин, А.С. *Тепломассообмен: учеб. для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.*

**Торопов Евгений Васильевич**, профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет; toropovev@susu.ac.ru.

**Осинцев Константин Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет; osintcevk@susu.ac.ru.

*Поступила в редакцию 29 июня 2015 г.*

## MATHEMATICAL MODEL OF HEAT TRANSFER INTO THE INTENSIVE BURNING ZONE OF STEAM GENERATOR

E.V. Toropov, toropovev@susu.ac.ru,

K.V. Osintsev, osintcevkv@susu.ac.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The conditions of decomposition for intensive burning zone (IBZ) on three component (furnace gas, flame continuum, solid fencing) are formulated in this article. The limits of these components are defined. The scheme of heat flows is developed. The parameters of flows and their characteristics are defined. The purpose of that development is definition of resultant heat flow onto the flame continuum. Three regime of heat radiation in the IBZ are defined. That are uniformly distributed and directed (direct and indirect). The conditions of their existing and main features are formulated.

*Keywords:* furnace, intensive burning zone, heat radiation, system component, heat exchange mode.

### References

1. Lykov A.V. *Teplomassoobmen: spravochnik* [Heat and Mass Transfer: Handbook]. Moscow, Energiya, 1978. 480p.
2. *Teplovoy raschet kotlov. Normativnyy metod* [Thermal Design of the Boilers. Standard Method]. St. Petersburg, NPO TSKTI – VTI, 1998. 256 p.
3. Roslyakov P.V. *Metody zashchity okruzhayushchey sredy: uchebnyy dlya vuzov* [Methods of Protection of the Environment: a Textbook for High Schools]. Moscow, MEI Publ., 2007. 336 p.
4. Telegin A.V., Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, IKTS Akademkniga, 2002. 455 p.

Received 29 June 2015

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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. DOI: 10.14529/power150403

### FOR CITATION

Toropov E.V., Osintsev K.V. Mathematical Model of Heat Transfer into the Intensive Burning Zone of Steam Generator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150403