

*А. ОТС, Р. РАНДМАНН*

## О ВЛИЯНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО МАССООБМЕНА НА УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКАХ

Условия лучистого теплообмена в топках существенно зависят от теплового сопротивления минеральных отложений на экранных трубах и градиента интенсивности излучения факела (степени неизотермичности факела) в термическом пограничном слое вблизи поверхности нагрева. Так, скорость загрязнения топки минеральными отложениями, как и степень неизотермичности факела, определяются интенсивностью турбулентного массообмена в топочной камере. До настоящего времени вопросу о влиянии турбулентного массообмена на условия лучистого теплообмена в топках не уделено достаточного внимания, и это влияние не отражается в существующих методах расчета. В статье показывается существование термического пограничного слоя газов вблизи топочных стен при сжигании некоторых топлив и делается попытка охарактеризовать его как долю от условного суммарного теплового сопротивления потоку тепла от факела к поверхности нагрева. В свете этого анализируется взаимосвязь между лучистым теплообменом и турбулентным переносом.

### 1. Тепловое сопротивление минеральных отложений

В зависимости от конкретных условий (свойства сжигаемого топлива, температура поверхности, интенсивность излучения факела и др.) экранные трубы топок покрываются минеральными отложениями, имеющими одно- или двухслойную структуру.

Однослойные отложения обычно возникают при сжигании топлив, неорганическая часть которых в топочном процессе химически не активируется. Эти отложения сыпучие и легко удаляются с поверхности.

При сжигании топлив, неорганическая часть которых в топочном процессе химически активируется, на экранных трубах могут возникнуть двухслойные отложения (не считая подслоя) [1]. Нижний (плотный) слой имеет высокую механическую прочность и не удаляется при очистке топки в рабочих условиях. Верхний (рыхлый) слой минеральных отложений располагается над плотным слоем и отделяется в ходе очистки только частично. Плотный слой образуется из той части рыхлого слоя, которая в интервале между очистками топки (т. е. при удалении рыхлого слоя) химически более прочно связывается с поверхностью существующего слоя и не удаляется в процессе очистки.

Интенсивность роста как сыпучих, так и рыхлых минеральных отложений, а следовательно и их тепловое сопротивление определяются плотностью массового потока веществ, вызывающих загрязнение, из топочного пространства к поверхности и условиями связывания их на той же поверхности. Скорость роста сыпучих отложений, возникающих над плотным слоем, существенно зависит от конструкции топки и теплонпряженности топочной камеры [2-4].

Рассмотрим образующиеся на топочных экранах слои минеральных отложений как плоскую стену: В таком случае их тепловое сопротивление выражается формулой

$$R = \left( \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma_0} \left( q_n^n - \frac{q_B}{\epsilon_n} \right)} - T_{\text{э}} \right) / q_B. \quad (1)$$

Если отложения имеют двухслойную структуру, то

$$R = R_0 + R_p. \quad (2)$$

Обозначая суммарное тепловое сопротивление отложений непосредственно после  $i$ -й очистки топки через  $R(0)_i$  и рыхлого слоя, возникающего в интервале времени между очистками, через  $R_p(\tau_0)$ , получим

$$R_0 = \sum_{i=1}^{n_0} [R(0)_{i+1} - R(0)_i] = \sum_{i=1}^{n_0} [R_p(\tau_0) (1 - \eta)]_i. \quad (3,4)$$

В формуле (3,4)  $\eta_i = 1 - [R(0)_{i+1} - R(0)_i] / R_p(\tau_0)$  обозначает к.п.д. очистки. При эффективной очистке  $\eta = 0,9960 \div 0,9985$  [3, 4].

В первом приближении можно считать, что тепловое сопротивление плотных отложений зависит от времени  $z = \sum_{i=1}^{n_0} (\tau_0)_i$  прямолинейно [3]. Здесь и далее предполагается, что продолжительность цикла очистки  $\Delta t = 0$ , т. е. очистка происходит мгновенно.

#### Обозначения

$q_n^n, q_n^0, q_n$ — падающий лучистый поток на плоскости отложений, на границе термического пограничного слоя и в глубине топки;	$\tau_0$ — интервал между циклами очистки поверхности нагрева;
$q_n$ — воспринимаемый поверхностью нагрева тепловой поток;	$\bar{H} = x/x_0$ — относительное расстояние по высоте топки;
$T_{\text{э}}$ — абсолютная температура поверхности нагрева;	$x_0$ — полная высота топки;
$\sigma_0$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела;	$x$ — расстояние до данной точки;
$\epsilon_n, \epsilon_{\text{э}}, \epsilon_p$ — степень черноты отложений, поверхности нагрева и диафрагмы радиометра;	$q_V, q_F$ — теплонапряженность топочного пространства и поперечного сечения;
$R_0, R_p$ — тепловое сопротивление плотного и рыхлого (сыпучего) слоя отложений;	$c, \rho$ — удельная теплоемкость и плотность материала диафрагмы радиометра;
$R_0'$ — тепловое сопротивление плотного слоя отложений, оставшегося на поверхности после его удаления;	$\delta$ — толщина диафрагмы;
$R$ — суммарное тепловое сопротивление минеральных отложений;	$\beta$ — коэффициент собственного излучения диафрагмы;
$R_0^*$ — условное тепловое сопротивление термического пограничного слоя;	$\Delta t$ — прирост температуры диафрагмы за промежуток времени $\Delta t_p$ ;
$R^* = R + R_0^*$ ;	$A$ — поправочный коэффициент ( $\approx 1$ );
$n_0$ — количество циклов очистки;	$y_0$ — условная толщина термического пограничного слоя;
	$\Delta \bar{q}_0$ — степень неизотермичности факела;
	$l$ — характерный размер топки;
	$K$ — конструктивная характеристика топки;
	$m, s$ — постоянные;
	$z_0$ — период между удалением плотного слоя отложений.

## 2. Степень неизотермичности факела

Существование термического пограничного слоя газов вблизи топочных поверхностей нагрева выясняется из рис. 1, где представлено изменение падающего полусферического лучистого потока по глубине топочного пространства перпендикулярно к плоскости экранов. Измерения

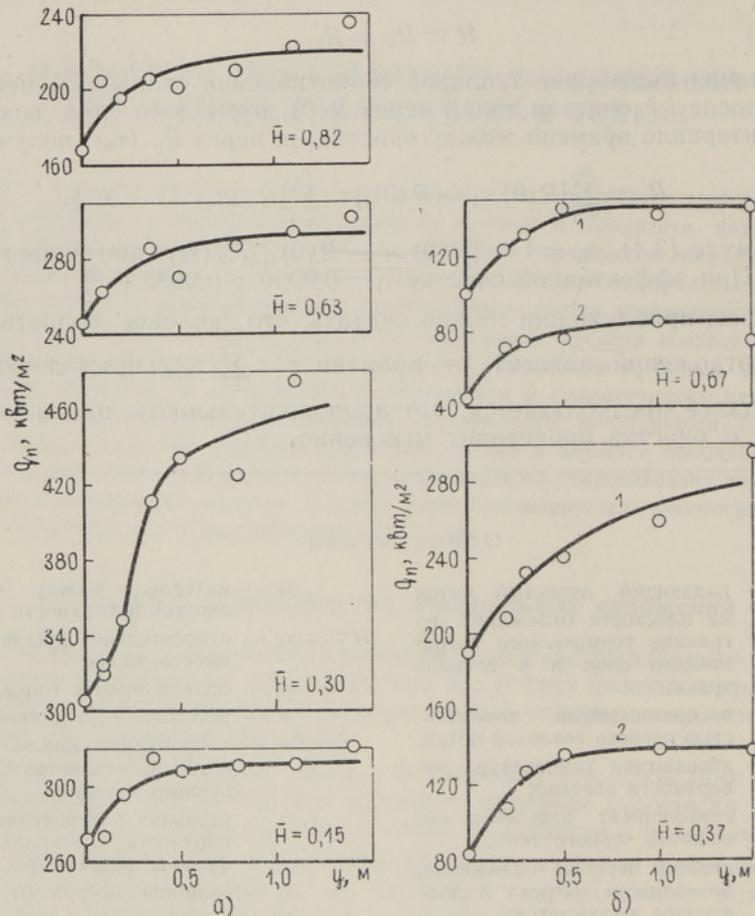


Рис. 1. Изменение падающего полусферического лучистого потока по глубине топки:

- а — топка пылесланцевого парогенератора,  $q_v = 96 \text{ кВт/м}^3$ ;  
 б — топка мазутного парогенератора; 1 —  $q_v = 105 \text{ кВт/м}^3$ ;  
 2 —  $q_v = 45 \text{ кВт/м}^3$ ;

проводились в топке пылесланцевого парогенератора высокого давления (угловое расположение горелок) и в топке мазутного парогенератора среднего давления (фронтальное расположение форсунок). Падающие лучистые потоки измерялись радиометром нестационарного теплового режима, причем воспринимаемый диафрагмой тепловой поток был рассчитан по формуле

$$q_n = cQ\delta \frac{1 + \beta}{A \varepsilon_p} \frac{\Delta t}{\Delta \tau_p}. \quad (5)$$

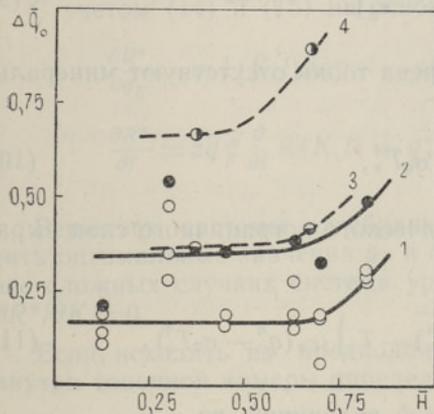
Из рисунка видно, что вблизи топочных стен находится область с высоким градиентом интенсивности излучения факела. Начиная с расстояния  $y = 0,5 \div 1,0$  м изменение  $q_n$  практически прекращается. Некоторые исключения имеют место в районах расположения горелок, где происходит интенсивное тепловыделение в процессе сгорания топлива. При определении толщины (условной) термического пограничного слоя  $y_0$  необходимо исходить из заданного значения  $\text{grad } q_n$ . Учитывая точность измерений, можно рекомендовать для определения  $y_0$  значения  $\text{grad } q_n$  в пределах от 5 до 10  $\text{квт/м}^3$ .

Для характеристики соотношений между интенсивностями лучистых потоков на топочной поверхности ( $y = 0$ ) и на расстоянии  $y_0$ , используем величину

$$\Delta \bar{q}_0 = (q_n^0 - q_n^n) / q_n^n, \quad (6)$$

которую назовем степенью неизотермичности факела.

Степень неизотермичности факела зависит от интенсивности турбулентного массообмена между центральной частью топки и термическим пограничным слоем, которая в свою очередь определяется аэродинамической схемой топочной камеры, теплонапряженностью поперечного сечения топки, свойствами сжигаемого топлива и другими параметрами. Особенно сильно на  $\Delta \bar{q}_0$  влияют схема расположения горелок и скорость газов в поперечном сечении топки. Исследования Ю. Муста [5] показывают, что конвективность в отдельных точках камерных топок при различных вариантах фронтальных горелок колеблется в пределах от 3,5 до 13. При этом под конвективностью понимается отношение коэффициента конвективной теплоотдачи в данной точке топки к тому же коэффициенту при омывании шероховатой поверхности в продольном потоке при скорости, равной средней скорости среды в поперечном сечении топки. Влияние скорости газов выясняется из рис. 2, где представлено изменение степени неизотермичности факела по высоте топки



в данной точке топки к тому же коэффициенту при омывании шероховатой поверхности в продольном потоке при скорости, равной средней скорости среды в поперечном сечении топки. Влияние скорости газов выясняется из рис. 2, где представлено изменение степени неизотермичности факела по высоте топки

Рис. 2. Изменение степени неизотермичности факела по высоте топки: 1 —  $q_F = 2,18 \div 2,30 \text{ мвт/м}^2$ ; 2 —  $q_F = 1,82 \text{ мвт/м}^2$  — топка пылесланцевого парогенератора; 3 —  $q_F = 1,03 \text{ мвт/м}^2$ ; 4 —  $q_F = 0,50 \text{ мвт/м}^2$  — топка мазутного парогенератора.

при различных значениях  $q_F$  (скорость газов пропорциональна  $q_F$ ). Видно, что с увеличением  $q_F$  степень неизотермичности факела уменьшается. Это вызвано интенсификацией турбулентного массообмена с повышением  $q_F$ .

### 3. Условное тепловое сопротивление термического пограничного слоя

При существовании термического пограничного слоя вблизи топочных стен интенсивность излучения факела на поверхности нагрева меньше, чем в глубине топочного пространства. В предельном случае, когда степень неизотермичности факела  $\Delta \bar{q}_0 = 0$ , нет потенциальных

возможностей увеличения  $q_n^n$  и тем самым отсутствует возможность интенсификации лучистого теплообмена в топках при заданном тепловом сопротивлении минеральных отложений. Следовательно, степень неизотермичности факела является параметром, который показывает потенциальные возможности интенсификации лучистого теплообмена за счет повышения интенсивности излучения факела на поверхности нагрева.

Поскольку при  $\Delta \bar{q}_0 > 0$  термический пограничный слой вблизи топочных стен составляет дополнительное тепловое сопротивление, то выражаем ее как разность:

$$R_0^* = R^* - R, \quad (7)$$

где  $R^*$  обозначает суммарное условное тепловое сопротивление потоку тепла от факела к поверхности нагрева, а  $R$  — суммарное тепловое сопротивление минеральных отложений, выраженное формулой (1).

Очевидно

$$R^* = \left( \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma_0} \left( q_n^0 - \frac{q_B}{\varepsilon_n} \right)} - T_{\text{э}} \right) / q_B. \quad (8)$$

Поскольку  $q_n^0 = (1 + \Delta \bar{q}_0) q_n^n$ , то

$$R^* = \left( \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma_0} \left[ (1 + \Delta \bar{q}_0) q_n^n - \frac{q_B}{\varepsilon_n} \right]} - T_{\text{э}} \right) / q_B. \quad (9)$$

В случае, если на поверхностях нагрева топки отсутствуют минеральные отложения

$$q_n^n - \frac{q_B}{\varepsilon_n} = \sigma_0 T_{\text{э}}^4, \quad (10)$$

условное тепловое сопротивление термического пограничного слоя выражается формулой

$$R_0^* = \left( \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma_0} (\Delta \bar{q}_0 \cdot q_n^n + \sigma_0 T_{\text{э}}^4)} - T_{\text{э}} \right) / \varepsilon_n (q_n^n - \sigma_0 T_{\text{э}}^4). \quad (11)$$

Так как обычно  $\sigma_0 T_{\text{э}}^4$  является малой величиной, то

$$R_0^* \approx \left( \sqrt[4]{\Delta \bar{q}_0 \cdot q_n^n / \sigma_0} - T_{\text{э}} \right) / \varepsilon_n q_n^n. \quad (12)$$

#### 4. Об оптимальных условиях теплообмена в топке

Проделанный анализ позволяет отметить, что процессы турбулентного массообмена в топках зависят, главным образом, от конструкции топочной камеры и ее теплонапряженности. Поскольку интенсивность загрязнения топочных экранов минеральными отложениями и степень

неизотермичности факела представляют собой величины, определяемые процессами массообмена, они также связаны между собой. С интенсификацией турбулентного массообмена скорость загрязнения экранов увеличивается, а степень неизотермичности факела падает.

С аэродинамической стороны камерная топка представляет собой канал прямоугольного сечения небольшой длины, имеющий сложный вход в виде горелок. В настоящее время отсутствуют методы, позволяющие рассчитывать процессы турбулентного обмена в таких сложных объектах. Основываясь на вышеотмеченном, считаем, что конвективный перенос в топочной камере зависит в основном от теплонпряженности поперечного сечения топки  $q_F$ , характерного размера  $l$  и конструктивного параметра  $K$ .

Выразим условное суммарное тепловое сопротивление потоку тепла от факела к экранной поверхности нагрева как сумму

$$R^* = R_0' + R_p + R_0 + R_0^* \quad (13)$$

Допустим, что при двухслойной структуре минеральных отложений

$$R_0 = A(K, l) z q_F^m \quad (14)$$

и

$$R_0^* = B(K, l) q_F^{-s} \quad (15)$$

В этих формулах  $A(K, l)$  и  $B(K, l)$  обозначают величины, зависящие от аэродинамической схемы топки и ее характерного размера.

С учетом (14) и (15) на основании (13) получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R^*}{\partial q_F} &= mA(K, l) z q_F^{m-1} - sB(K, l) q_F^{-(1+s)} = 0 \\ \frac{\partial R^*}{\partial l} &= z q_F^m \frac{\partial}{\partial l} A(K, l) + q_F^{-s} \frac{\partial}{\partial l} B(K, l) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Решением системы алгебраических уравнений (16) можно установить оптимальные значения  $q_F$  и  $l$ , отвечающие минимальному  $R^*$ . В более сложных случаях система уравнений (16) дополняется уравнением  $\partial R^* / \partial K = 0$ .

Если исходить из предположения, что турбулентный массообмен внутри топочной камеры определяется числом Рейнольдса, то

$$Re \sim q_F l \sim \frac{Q}{l} \quad (17)$$

и  $A(K, l) = A_0(K) l^m$ ,  $B(K, l) = B_0(K) l^{-s}$ . Учитывая это, оптимальное значение комплекса  $q_F l$  равно

$$[q_F l] = \left[ \frac{s}{m} \frac{B_0(K)}{A_0(K) z_0} \right]^{\frac{1}{m+s}} \quad (18)$$

и минимальное условное суммарное тепловое сопротивление, отвечающее заданному периоду эксплуатации агрегата  $z_0$ , выражается формулой

$$R_{\text{мин}}^* = R_0' + R_p + \left\{ [A_0(K)z_0]^s \left[ \frac{s}{m} B_0(K) \right]^m \right\}^{\frac{1}{m+s}} + \\ + \left\{ \left[ \frac{m}{s} A_0(K)z_0 \right]^s [B_0(K)]^m \right\}^{\frac{1}{m+s}}. \quad (19)$$

В частном случае, когда  $m = s = 1$ ,

$$[q_F l] = \sqrt{\frac{B_0(K)}{A_0(K)z_0}} \quad (20)$$

и

$$R_{\text{мин}}^* = R_0' + R_p + 2\sqrt{A_0(K)B_0(K)z_0}. \quad (21)$$

Выражение (13) применимо также в условиях, когда на экранных трубах топок возникают легкоудаляемые сыпучие или рыхлые отложения. В таком случае  $R_0 = 0$  и  $R_p = C(K, l, \tau) q_F^p$ .

## 5. Основные выводы

1. Интенсивность лучистого теплообмена в топках существенно зависит от процессов турбулентного массообмена внутри топочной камеры, причем особенно сильное влияние оказывает аэродинамическая схема топки и теплонапряженность поперечного сечения.

2. Оптимальной является такая аэродинамическая схема топки, которая обеспечивает минимальную скорость загрязнения при минимальной степени неизотермичности факела.

3. При образовании на экранных трубах двухслойных минеральных отложений необходимо использовать такие способы очистки, которые обеспечивали бы минимальную скорость роста плотного слоя отложений или позволяли бы полное или частичное удаление его в рабочих условиях топки (сокращение периода  $z_0$ ).

4. Наиболее эффективным приемом интенсификации лучистого теплообмена в топках при образовании на экранных трубах легкоудаляемых минеральных отложений является применение таких топочных устройств, которые имели бы высокую турбулентность факела. При работе на нестационарном режиме необходимо одновременно увеличить частоту очистки.

5. Увеличение турбулентного массообмена в мазутных топках (вероятно, и в газовых топках) ведет к интенсификации лучистого теплообмена.

6. Исследованию процессов турбулентного массообмена внутри топочных камер, как сложных аэродинамических объектов, необходимо уделять больше внимания, чем это делалось до сих пор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Отс А. А., Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А, № 240, 27—44 (1966).
2. Эпик И. П., Отс А. А., Изв. вузов СССР. Энергетика, № 8, 50—55 (1962).
3. Отс А. А., Пиркер Т. А., Егоров Д. М., Сельг В. А., Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А, № 255, 27—47 (1967).

4. Отс Арво А., Отс Агу А., Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А, № 255, 49—68 (1967).
5. Муст Ю. К., Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А, № 206, 67—74 (1963).

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию  
8/IX 1967

A. OTS, R. RANDMANN

#### TURBULENTSE MASSIVAHETUSE MÕJUST SOOJUSÜLEKANDELE KOLLETES

Artiklis käsitletakse turbulentse massivahetuse mõju kiirgussoojusülekandele kolletes. Näidatakse, et turbulentse massivahetuse intensiivistumisega kolde kambris intensiivistub kolde ekraantorude saastumine leegi mitteisotermilisusastme samaaegse vähenemisega kolde seinteäärses termilises piirikihis.

A. OTS, R. RANDMANN

#### THE INFLUENCE OF TURBULENT MASS TRANSFER ON HEAT TRANSFER CONDITIONS IN FURNACES

The paper deals with the effect of turbulent mass transfer on radiant heat transfer in furnaces. It is stated that if the turbulent mass transfer intensity increases, the fouling of the screen tubes increases as well, while the rate of the radiation intensity in the thermal boundary layer at the walls of the furnace decreases.