

УДК 536.3.535.34

А. М. Абдуллин

## ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН В «ОКНАХ» ПРОЗРАЧНОСТИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

*Ключевые слова: теплообмен, спектр, продукты сгорания, спектральная полоса поглощения.*

*В рамках  $S_6$  – приближения метода дискретных ординат проанализирован лучистый теплообмен в «окнах» прозрачности спектра излучения продуктов сгорания газообразного топлива, состоящих из  $H_2O$ ,  $CO_2$ . Показано, что «окна» прозрачности спектра наиболее эффективно используются при больших значениях степени черноты излучающей футеровки.*

*Keywords: heat transfer, spectrum, combustion products, spectral absorption band.*

*Within  $S_6$  - approximation discrete ordinate method radiative heat transfer is analyzed in "windows" transparency of the emission spectrum of gaseous fuel combustion, consisting of  $H_2O$ ,  $CO_2$ . It is shown that the "window" transparency spectrum are most effectively used for large values of the emissivity of the radiating lining.*

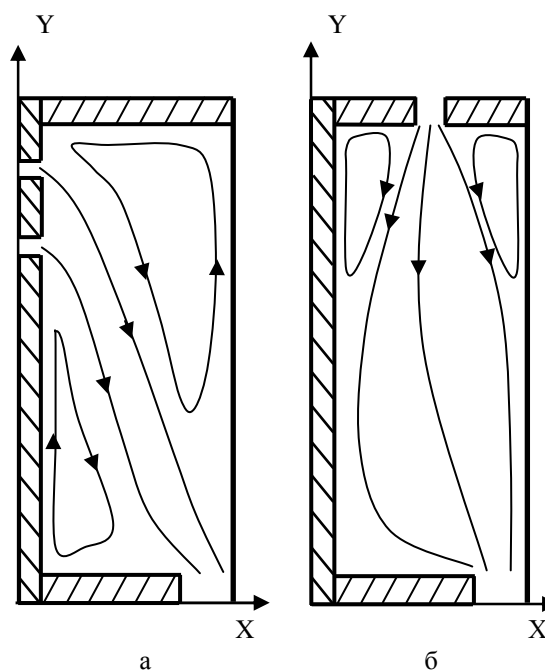
Большое практическое значение имеют вопросы интенсификации теплообмена в высокотемпературных энергетических и технологических установках. Этому вопросу посвящен ряд работ [1,2]. Одним из возможных путей решения этого вопроса является расчетно-теоретический анализ различных режимов теплообмена в топках. Переход от одних режимов теплообмена к другим сводится к перестройке температурного поля в объеме топки и изменении места локализации области высоких температур. При этом важную роль в теплообмене играет футеровка печи. Поглощенная футеровкой тепловая энергия возвращается обратно в объем топки посредством излучения. Пламя, особенно при наличии дисперсных частиц, например, сажи, экранирует поверхность нагрева от футеровки. Однако в «окнах» прозрачности спектра излученная футеровкой энергия беспрепятственно достигает поверхности нагрева.

Объектом исследования является вертикально расположенный плоский канал высотой  $L$  и шириной  $H$ , приближенно моделирующий радиантную камеру (рис.1). Стенки канала образованы огнеупорной футеровкой и поверхностью нагрева с известной температурой  $T_n$ . Рассмотрены два режима теплообмена: косвенно направленный (а) и равномерно распределенный (б). Объем камеры заполнен селективно излучающей, поглощающей и слабо рассеивающей средой продуктов сгорания газообразного топлива.

Лучистый теплообмен моделируется в рамках  $S_6$  – приближения метода дискретных ординат [3]. Интегрально-дифференциальное уравнение переноса излучения приближенно заменяется системой дифференциальных уравнений относительно интенсивностей излучения вдоль определенного количества соответствующим образом выбранных направлений:

$$\begin{aligned} \mu_m \frac{\partial I_{m,\lambda}}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_{m,\lambda}}{\partial y} = \\ = \alpha_\lambda I_{b\lambda} - (\alpha_\lambda + \beta) I_{m,\lambda} + \frac{\beta}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} I_{m',\lambda} \Omega_{m'} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $m = 1, N_0$ ;  $\Omega_m$  – весовой коэффициент, численно равный площади поверхности сферы единичного радиуса, отсекаемой соответствующим направлению  $(\mu_m, \xi_m)$  телесным углом (табл.1).



**Рис. 1 – Объект исследования. Режимы теплообмена: а – КНРТ, б - РРРТ**

Граничные условия к уравнению (1) имеют вид:

$$I_{m,\lambda} = \varepsilon I_{b\lambda} + \frac{r}{\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} \left[ |0, -\mu_{m'}| \right] I_{m',\lambda} \Omega_{m'} \quad (2)$$

при  $x=0, \mu_m \geq 0$ .

$$I_{m,\lambda} = \varepsilon I_{b\lambda} + \frac{r}{\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} \left[ |0, \mu_{m'}| \right] I_{m',\lambda} \Omega_{m'} \quad (3)$$

**Таблица 1 – Угловые ординаты и весовые коэффициенты  $S_6$  - приближения для первого квадранта [4]**

| № | $\mu$     | $\xi$     | $\Omega$  |
|---|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,1838670 | 0,1838670 | 0,1609517 |
| 2 | 0,6950514 | 0,1838670 | 0,3626469 |
| 3 | 0,9656013 | 0,1838670 | 0,1609517 |
| 4 | 0,1838670 | 0,6950514 | 0,3626469 |
| 5 | 0,6950514 | 0,6950514 | 0,3626469 |
| 6 | 0,1838670 | 0,9656013 | 0,1609517 |

при  $x=H$  и  $\mu_m \leq 0$ . На других границах  $y=0$  и  $y=L$  используются аналогичные условия.

Оператор  $[|A, B|]$  обозначает наибольшую из величин  $A$  и  $B$ .

Система уравнений (1) с граничными условиями (2), (3) решается численно на неравномерной конечно-разностной сетке.

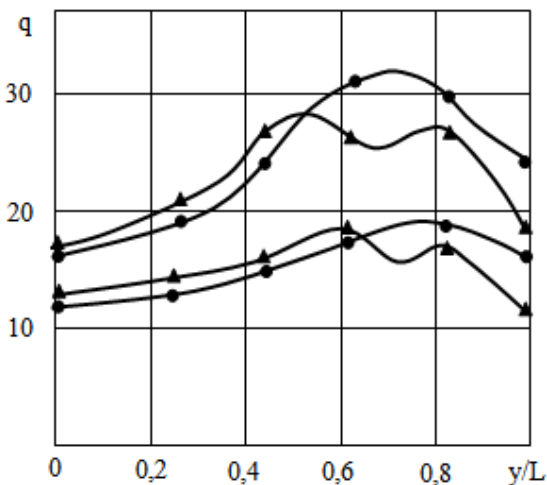
Интегрируя уравнение (1) по контрольному объему, можно получить его конечно-разностный аналог:

$$\mu_m A_l \left( I_{m,\lambda}^{k+1,l} - I_{m,\lambda}^{k-1,l} \right) + \xi_m B_k \left( I_{m,\lambda}^{k,l+1} - I_{m,\lambda}^{k,l-1} \right) = R_{k,l} - \psi_{k,l} I_{m,\lambda}^{k,l} \quad (4)$$

где

$$R_{k,l} = \alpha_{\lambda}^{k,l} I_{b\lambda} (T_{k,l}) A_l B_k + \frac{\beta_{k,l} A_l B_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} I_{m',\lambda}^{k,l} \Omega_{m'};$$

$$\psi_{k,l} = (\alpha_{\lambda}^{k,l} + \beta_{k,l}) A_l B_k; A_l = y_{l+1} - y_l; B_k = x_{k+1} - x_k.$$



**Рис. 2 – Распределение плотности теплового потока к поверхности нагрева в «окнах» прозрачности ( $\text{kWt/m}^2$ ). ▲ – КНРТ; • – РРРТ**

Рассмотрим метод решения уравнения (4). Пусть для положительных направлений ( $\mu_m \geq 0, \xi_m \geq 0$ ) выполняются следующие соотношения:

$$I_{m,\lambda}^{k,l} = w I_{m,\lambda}^{k,l+1} + (1-w) I_{m,\lambda}^{k,l-1} = w I_{m,\lambda}^{k+1,l} + (1-w) I_{m,\lambda}^{k-1,l} \quad (5)$$

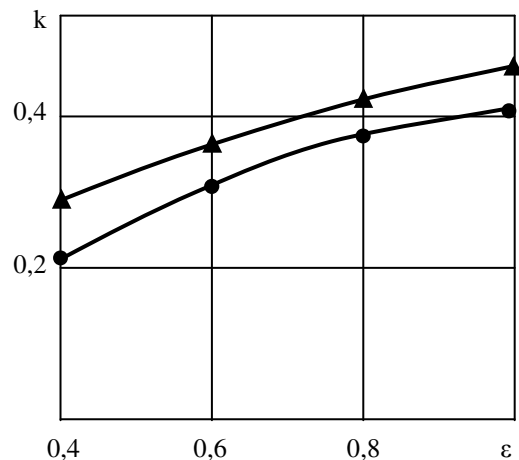
где  $w$  – интерполяционный коэффициент ( $0 \leq w \leq 1$ ). Подставляя выражение (5) в уравнение (4), находим формулу для покоординатной прогонки:

$$I_{m,\lambda}^{k,l} = \frac{\mu_m A_l I_{m,\lambda}^{k-1,l} + \xi_m B_k I_{m,\lambda}^{k,l+1} + w R_{k,l}}{w \psi_{k,l} + \mu_m A_l + \xi_m B_k} \quad (6)$$

Для отрицательных направлений ( $\mu_m \leq 0, \xi_m \leq 0$ ) могут быть получены аналогичные выражения.

При заданном начальном приближении для интенсивности излучения, по формулам (2), (3) вычисляется интенсивность излучения на граничных поверхностях расчетной области. Затем по формуле (6) определяется следующее приближение для интенсивности излучения во всех узловых точках конечно-разностной сетки и направлениях, заданных набором чисел ( $\mu_m, \xi_m; m=1, N_0$ ). Итерации продолжаются до выполнения соответствующим образом выбранного критерия сходимости.

Результаты расчетов показывают, что лучистая теплопередача в «окнах» прозрачности спектра играют большую роль. При косвенном направленном режиме теплообмена (КНРТ) доля лучистой теплопередачи в «окнах» прозрачности в общем тепловом балансе камеры радиации составляет 45%, при равномерно распределенном режиме (РРРТ) – 36%. Причина заключается в том, что «окна» прозрачности имеют относительно большую ширину, чем спектральные полосы поглощения излучающих газов. Вторая причина



**Рис. 3 – Вклад «окон» прозрачности в тепловой поток к поверхности нагрева. Обозначения аналогичны рис. 2**

состоит в том, что «окна» прозрачности расположены в области спектра, где интенсивность

излучения абсолютно черного тела имеет максимальное значение. Как следует из таблицы 2, наибольшее количество лучистой энергии поверхности нагрева передается в спектральной полосе 2,7мкм и в пределах «окна» прозрачности между спектральными полосами 1,5мкм и 2,7мкм.

**Таблица 2 – Доля лучистой теплопередачи в интервалах спектра, %**

| Режим | Длина волны спектральной полосы, мкм |     |     |        |    | «Окна» прозрачности |           |           |
|-------|--------------------------------------|-----|-----|--------|----|---------------------|-----------|-----------|
|       | 1,5                                  | 2,7 | 4,3 | 6,3+10 | 15 | 0 – 1,5             | 1,5 – 2,7 | 2,7 – 4,3 |
| КНРТ  | 6                                    | 22  | 7   | 16     | 4  | 9                   | 25        | 11        |
| РРРТ  | 7                                    | 26  | 10  | 16     | 5  | 8                   | 20        | 8         |

При косвенном направленном режиме теплообмена в объеме камеры радиации возникают две достаточно большие области рециркуляционного течения, которые отсутствуют при равномерно распределенном режиме теплообмена. Эти области, имея более низкую температуру, экранируют поверхность нагрева как от излучающей поверхности футеровки, так и от горячих продуктов сгорания. Поэтому равномерно распределенной режим теплообмена обеспечивает большее тепловосприятие поверхностью нагрева.

Эффективность теплообмена в «окнах» прозрачности спектра можно характеризовать коэффициентом  $k$ , равным отношению теплового потока к поверхности нагрева в «окнах» прозрачности к общему тепловому потоку.

Зависимость этого коэффициента от степени черноты футеровки представлена на рис.3. «Окна» прозрачности спектра наиболее эффективно используются при больших значениях степени черноты излучающей футеровки. При увеличении степени черноты футеровки от значения 0,6 до 0,8 тепловой поток к поверхности нагрева в «окнах» прозрачности возрастает приблизительно на 22% при обоих режимах теплообмена. Спектр отраженного от футеровки излучения в большей своей части является «полосатым», имея в полосах поглощения продуктов сгорания наибольшую интенсивность, а в «окнах» прозрачности между ними – наименьшую интенсивность. Небольшая интенсивность отраженного излучения в «окнах» объясняется рассеянием и отражением излучения от поверхности нагрева и футеровки. В то же время спектр собственного излучения футеровки имеет сплошной характер и для этого излучения интервалы спектра между полосами поглощения являются прозрачными.

### Литература

1. Д.Б. Вафин, А.М. Абдуллин, *Вестник КГТУ*, 1, 90 – 96 (2009).
2. Л.И. Валь, Б.С.Сорока, *Сравнение режимов теплообмена в неизотермическом слое газа*: В сб.: Процессы переноса теплоты и вещества. Киев, Наукова думка, 1985. С. 121-131.
3. А.М. Абдуллин, Д.Б.Вафин, *ИФЖ*, 60, 2, 291 – 297 (1991).
4. W.A. Fiveland, Trans. ASME: J. Heat transfer, 106, 4, 699 – 706 (1984).