

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА

## АННОТАЦИЯ

Рассмотрены принципиальные аспекты проблемы переноса излучения в высокотемпературных средах и пламенах и ее решение применительно к теплообменным процессам в энергетических установках и дистанционной диагностики состава продуктов сгорания энергетических топлив и их атмосферных выбросов. Разработана математическая модель переноса излучения, позволяющая моделировать спектры интенсивности теплового излучения высокотемпературных двухфазных сред и выявлять информационное содержание в интересах их диагностики. Особое внимание уделено учету неравновесных процессов излучения, которые могут быть вызваны химическими реакциями при горении топлив. Основу моделирования переноса излучения составляют радиационные характеристики компонентов газовой и дисперсной фаз продуктов сгорания.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается применение численного моделирования для решения задач радиационного теплообмена в структурно-неоднородных двухфазных средах, которые реализуются при сгорании топлива в котельных агрегатах, атмосферных выбросах от аэроносителей, при движении аэроносителей со сверхзвуковыми скоростями, при лесных пожарах. Оптически активные ингредиенты газовой фазы продуктов сгорания обладают острой селекцией спектральных линий поглощения (излучения), что вызывает отличие функций спектрального пропускания (ФСП) для селективного излучения среды распространения излучения от ФСП для источников неселективного излучения (серое тело). При наличии дисперсной фазы в газовой среде острой селекции подвергается такой параметр среды распространения излучения как «вероятность выживания кванта». Число спектральных линий, определяющих ФСП, возрастает с ростом температуры и при высоких температурах определяется сотнями тысяч линий. При решении задач радиационного теплообмена методом численного моделирования необходимо знать параметры спектральных линий (ПСЛ), интенсивности, полуширины, положение центров, контуры и их зависимости от температуры. При высоких температурах продуктов горения  $T > 2000$  К необходим учет неравновесности излучения, когда колебательная температура различных ингредиентов отличается от газокинетической. В связи с громоздкостью численного моделирования радиационного теплообмена по ПСЛ актуальна разработка приближенных методов расчета, когда параметры ФСП из данных эксперимента, выполненного при различных температурах на пламенных измерительных комплексах.

В настоящей работе рассмотрено замкнутое моделирование радиационного теплообмена в топочных камерах, когда вычисляется сначала поле температуры в камерах сгорания, а затем потоки теплового излучения на трубные тепловоспринимающие поверхности.

## 2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основными оптически-активными компонентами продуктов сгорания углеводородных топлив являются водяной пар, углекислый газ, OH, CO, оксиды азота NO, NO<sub>2</sub>, дисперсная фаза продуктов сгорания, представляющая собой частицы сажи и минеральной фракции выгоревшего топлива. Для газовых компонентов продуктов сгорания ФСП вычисляются двухпараметрическим методом эквивалентных масс [1–3], позволяющим решать задачи радиационного теплообмена в структурно-неоднородных средах. ФСП  $\tau_{\Delta vi}$  для компонента  $i$  определяется из соотношения

$$\left(\frac{1}{\ln \tau_{\Delta vi}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\ln \tau'_{\Delta vi}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\ln \tau''_{\Delta vi}}\right)^2 + \frac{M_i}{\ln \tau'_{\Delta vi} \ln \tau''_{\Delta vi}}, \quad (1)$$

$$\text{где } |\ln \tau'_{\Delta vi}| = \int_L \kappa_{\Delta vi} \mathcal{F}_1[L(T)] \mathcal{P}_i(L) dL,$$

$$|\ln \tau''_{\Delta vi}| = \left[ \int \beta_i \mathcal{P}_i(L) P_9^{n_i/m_i}(L) \mathcal{F}_2^{1/m_i}(T) dL \right]^m, \quad (2)$$

$n_i$ ,  $m_i$ ,  $\kappa_{\Delta vi}$ ,  $\beta_{\Delta vi}$ ,  $M_i$  – эмпирические параметры ФСП по спектру волнового числа  $\nu$ ;

$$\tau_{\Delta v} = \exp\left[-\sum_i \ln \tau_{\Delta vi}\right]; \quad (3)$$

$\mathcal{F}_1(T)$ ,  $\mathcal{F}_2(T)$  – температурные зависимости

$\kappa_{\Delta vi} / \kappa_{\Delta vi0}$ ,  $\beta_{\Delta vi} / \beta_{\Delta vi0}$ .

В соотношении (2)  $P_9$  – эффективное давление:

$$P_9 = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} P_k, \quad (4)$$

где  $B_{ik}$  – фактор уширения спектральных линий для столкновений молекул  $i$  и  $k$ . Для кислорода  $B(O_2) = 0.8$ ,  $B(CO_2) = 1.4 \div 1.6$ . Для водяного пара  $B(H_2O) \in [6, 30]$  и значительно зависит от температуры.

Дисперсная фаза продуктов сгорания учитывается в соответствии с экспериментальными данными

[6] по микроструктуре сажевого золя и его концентрации. Необходимые для расчетов параметры (эффективные сечения поглощения, рассеяния, индикатрисы рассеяния) вычислены в соответствии с микроструктурой сажевого золя и используются в расчетных схемах. Для применения в камерных топках при использовании каменных углей подготовлена электронная библиотека оптических характеристик сажевого и минерального золой различной микроструктуры в виде гамма-распределений с модальными радиусами  $r_m$  от 0.003 до 10 мкм.

### 3. ЗАМКНУТОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В МНОГОКАМЕРНЫХ ТОПКАХ

В настоящее время есть две возможности повышения эффективности радиационного теплообмена в топках и паропроизводительности котельных установок: увеличение числа горелок в топке с созданием сильных радиационных контрастов отдельных пламен на общем тепловом фоне продуктов сгорания в топке и создание многокамерных топков, где увеличение эффективности радиационного теплообмена достигается за счет сохранения габаритов топочной камеры многокамерной конструкции. Второй вариант более эффективен, допускает широкое многообразие конструктивных решений, позволяет конструировать паровые котлы с естественной и принудительной циркуляцией, а также применять смешанные формы циркуляции. Многокамерные топки могут использоваться для сжигания твердых топлив. В этом случае перспективно применение в котельных установках сжигания топлива в циклонных предтопках, позволяющих очистить продукты сгорания от зольной составляющей продуктов сгорания и шлаков. Сама топочная камера в этом случае является фактически радиационным теплообменником, который для повышения эффективности радиационного выхолаживания продуктов сгорания выполняется многокамерным.

Согласно разработанной нами математической модели радиационного теплообмена, радиационное выхолаживание в топке определяется скоростью радиационного выхолаживания  $\partial T/\partial t$  ( $t$  – время) и временем пребывания продуктов сгорания в топке, так что температура на выходе из топки определяется соотношением

$$T_{\text{вых}} = T_a - \int_0^H \frac{\partial T}{\partial t}(z) \frac{dz}{v(z)}, \quad (5)$$

где  $T_a$  – адиабатическая температура продуктов сгорания;  $v(z)$  – скорость движения продуктов сгорания; зависящая от координаты  $z$  с изменением температуры  $T(z)$  по ходу движения продуктов сгорания. Из соотношения (5) следует, что с увеличением тепловой нагрузки топки температура на выходе из топки возрастает. Наибольшее радиационное выхолаживание будет наблюдаться при применении подовых горелочных устройств, обеспечивающих максимальное время пребывания продуктов сгора-

ния в топке. Для заданной высоты топки и ее размеров повышение паропроизводительности котла можно достигнуть путем увеличения скорости радиационного выхолаживания  $\partial T/\partial t$ , которое достигается снижением поперечного сечения отдельных камер в многокамерной топке.

При решении задач радиационного теплообмена в теплоагрегатах будем оперировать интегральными интенсивностями  $J^{\uparrow\downarrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n)$ :

$$J^{\uparrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n) = \int_0^{\infty} J\lambda^{\uparrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n) d\lambda, \quad (6)$$

$$J^{\downarrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n) = \int_0^{\infty} J\lambda^{\downarrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n) d\lambda, \quad (7)$$

где  $J\lambda^{\uparrow\downarrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n)$  – спектральные интенсивности теплового излучения,  $Z_n$  – высота наблюдения,  $Q_n$ ,  $\varphi_n$  – зенитный и азимутальный углы визирования, соответственно.

Проинтегрировав  $J^{\uparrow\downarrow}(z_n, \theta_n, \varphi_n)$  в пределах телесного угла  $2\pi$  получим для потоков теплового излучения соотношения

$$J^{\uparrow\downarrow}(z_n) = \int_0^{2\pi} J^{\uparrow\downarrow}(z, \theta, \varphi) d\Omega, \quad (8)$$

где  $d\Omega$  – элемент телесного угла. Скорость радиационного выхолаживания  $\partial T/\partial t$  определяется соотношением

$$\frac{\partial T(z, \theta, \varphi)}{\partial t} = \frac{1}{\rho(z, \theta, \varphi) C_p(z, \theta, \varphi)} \cdot \frac{\partial F(z, \theta, \varphi)}{\partial z}, \quad (9)$$

где  $\rho(z, Q, \varphi)$ ,  $C_p(z, Q, \varphi)$  – соответственно плотность и теплоемкость в локальной точке с координатами  $z, Q, \varphi$ . Обозначим

$$F(z, \theta, \varphi) = F^{\uparrow}(z, \theta, \varphi) - F^{\downarrow}(z, \theta, \varphi). \quad (10)$$

Наиболее эффективно радиационное выхолаживание проявляется в ядре факела, в связи с чем его температура на 15–20 % ниже адиабатической. Это означает, что за время сгорания топлива факел значительно остывает в результате радиационного выхолаживания. Эти результаты подтверждаются теоретическими расчетами, выполненными по разработанной математической модели, учитывающей влияние неравновесных процессов на радиационный теплообмен.

Для формирования короткого пламени целесообразно использовать многорядные горелочные устройства, где подача воздуха и подача топлива чередуются и осуществляются через капиллярные трубки, смонтированные в матричного типа горелочное устройство.

На рис. 1 приведены примеры расчетов вертикальных профилей скоростей радиационного выхолаживания  $\partial T(z)/\partial t$ ,  $\frac{\partial T(z)}{\partial z}$ , где  $T(z)$  – температурный профиль средней по сечению температуры в зависимости от высоты  $z$  над срезами капилляров

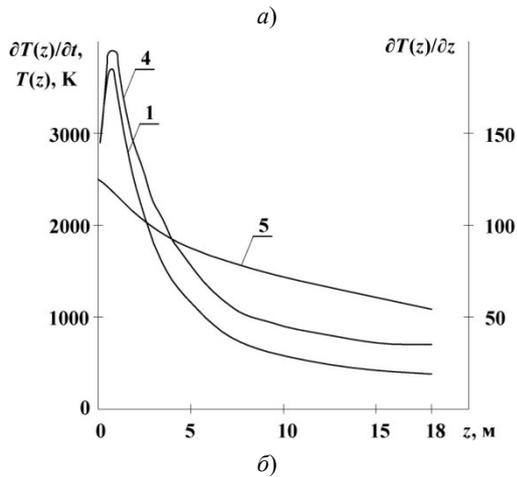
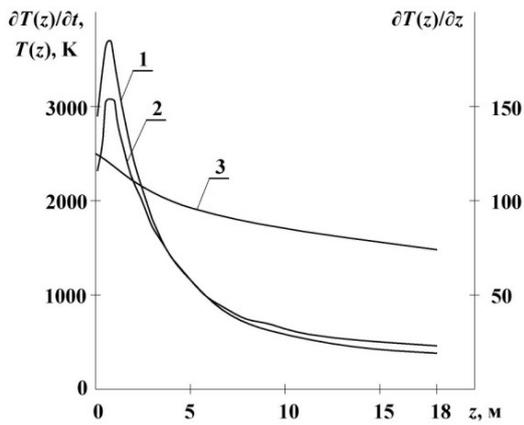


Рис.1. Результаты расчета радиационного теплообмена в многокамерной топке для начальной средней скорости течения продуктов сгорания 25 м/с (а) и 20 м/с (б): 1 –  $\partial T(z)/\partial t$ ; 2 –  $\partial T(z)/\partial z$ ; 3 –  $T(z)$ ; 4 –  $\partial T(z)/\partial z$ ; 5 –  $T(z)$

матричного горелочного устройства. Топливо – природный газ, размер горизонтального сечения ячейки многокамерной топки  $1.25 \times 1.6$  м. Скорость продуктов сгорания на начальном участке 25 м/с и 20 м/с при давлении в топке  $1 \times 10^5$  Па, высота пламенной зоны  $\Delta z = 0.7$  м. В расчетах учтено равновесное и неравновесное радиационное выхолаживание. Предполагается, что процесс горения различных ингредиентов газового топлива происходит независимо при оптимальном значении коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1.03$ . Объемные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния нормированы на измеренные значения оптической плотности золя [1–3].

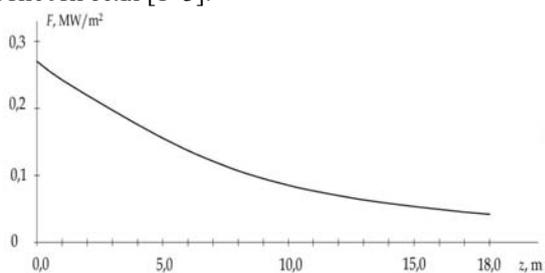


Рис. 2. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания в случае слабого поглощения

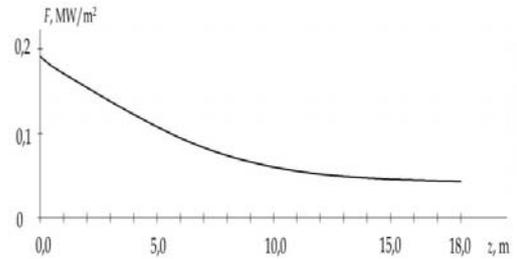


Рис. 3. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного с использованием функции спектрального пропускания по двухпараметрическому методу эквивалентных масс

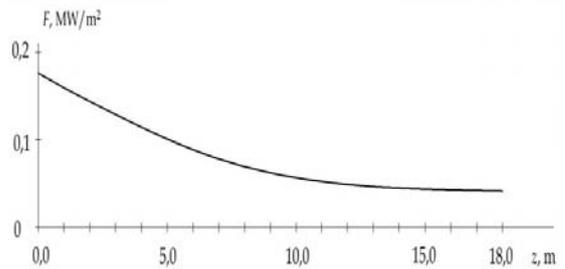


Рис. 4. Распределение интегрального потока излучения в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного без учета эффективного давления

На рис. 2–4 приведены распределения интегрального потока  $F(z)$  в зависимости от высоты в камере сгорания, рассчитанного с использованием функций спектрального пропускания по двухпараметрическому методу эквивалентных масс, и приближение «слабого поглощения»

С появлением суперкомпьютеров становится возможным применение численных методов решения задач переноса излучения [5]. Их применение ограничено недостаточной надежностью сведений по параметрам спектральных линий газовых компонентов продуктов сгорания при высоких температурах, реализуемых в камерах сгорания энергетических агрегатов.

При выполнении расчетов радиационного теплообмена использован двухпараметрический метод эквивалентной массы при вычислении спектральных интенсивностей теплового излучения [1, 4, 6–9].

Наиболее высокая радиационная нагрузка наблюдается в нижней части топки и на матричном многорядном горелочном устройстве, которое выполняется с охлаждением водой по независимому контуру циркуляции.

Для топок с твердым топливом расчеты выполнены с циклонными предтопками. Расчеты выполняются с учетом сажевой дисперсной фазы, вклад которой в радиационный теплообмен является значительным.

Сгорание твердого топлива мелкого дробления в циклонных предтопках позволит наиболее эффективно улавливать золу в пределах предтопки. Предполагается встречная подача продуктов сгорания из предтопок в рабочую камеру, которая в этом случае является теплообменником. Закрученные встречные потоки продуктов сгорания разбиваются и запол-

няют камеру. Тангенциальная скорость движения потоков резко снижается и кинетическая энергия движения потоков переходит в тепловую. Далее происходит радиационный теплообмен в камере при течении продуктов сгорания топлива и передача энергии излучения на трубные теплопринимающие поверхности. Каждая ячейка многокамерной топки имеет две циклонные предтопки. Число ячеек определяет полную производительность котельной установки.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение остановимся на основных результатах, полученных в настоящей работе.

1. Разработан метод моделирования переноса теплового излучения в многокомпонентной неоднородной по структурным характеристикам атмосфере топочного пространства. Предложены конструкции многокамерных топок с восходящим движением продуктов сгорания и вертикальным развитием пламени подовых многорядных горелочных устройств матричного типа с общим газовым коллектором для подачи топлива и коллектором для подачи окислителя (воздуха или кислорода). Горелочное устройство целесообразно выполнить с радиатором для охлаждения его водой по независимому циркуляционному контуру. Конструкция многокамерной топки при использовании газового топлива позволяет повысить коэффициент полезного действия на 2–3 % и увеличить его производительность в 2–3 раза при сохранении параметров пара и габаритов котла.

2. Выполнено замкнутое моделирование радиационного теплообмена в камере сгорания многокамерной топки с горизонтальным сечением ячейки 1.25×1.6 м и 1.4×1.4 м при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.03$  и средней начальной скорости продуктов сгорания 25 и 20 м/с. Получены сведения по скоростям радиационного выхолаживания  $\frac{\partial T}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial z}$  и температурному профилю  $T(z)$  в зависимости от высоты  $z$  над срезами капилляров матричного горелочного устройства. Выполнены расчеты теплоосприятия по теплопринимающим поверхностям топочной камеры. Полный поток  $F$  теплового излучения на поверхности топки согласуется с изменением энтальпии на выходе из топки с погрешностью 0.3 %. Неравновесное радиационное выхолаживание составляет 7.5 %. Учет эффективного давления в топке приводит к росту полного потока излучения  $F$  на 5–6 %.

3. Для котлов многокамерной конструкции, работающих на твердом топливе, целесообразно

применение конструкции с циклонными предтопками, создающими встречные потоки продуктов сгорания. Рабочая камера в этом случае является теплообменником с трубными теплопринимающими поверхностями при восходящем течении продуктов сгорания.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $\tau_{\Delta v}$  — функция спектрального пропускания;
- $P_3$  — эффективное давление;
- $F$  — приток излучения;
- $F\uparrow\downarrow$  — потоки восходящего и нисходящего излучения;
- $T(z)$  — температурный профиль в зависимости от высоты  $z$ ;
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial z}$  — скорость изменения температуры в зависимости от времени и по высоте топки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш.** Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен. Казань: Изд-во КГЭУ, 2014. 260 с.
2. **Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Ilin Ya.A.** Investigation of nonequilibrium hydroxyl emission spectra // *Rus. Phys. J.* New York: Sprigerlink, 2010. V. 53. No. 2. P. 107–113.
3. **Transfer over of nonequilibrium radiation in flames and high-temperature mediums / N.I. Moskalenko, A.V. Zaripov, N.F. Loctev et al.** // *Intechweb. Croatia. Optoelectronics – deoises and applications.* 2011. P. 469–526.
4. **Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Каюмова Г.В.** Измерительный комплекс высокого спектрального разрешения для исследований пламени // *ЖПС.* 1992. Т. 56. № 1. С. 122–127.
5. **Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Садыкова М.С.** Исследование спектров эмиссии и поглощения излучения водяным паром // *Изв. вузов. Физика.* 2014. Т. 57. № 9. С. 3–8.
6. **Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Загидуллин Р.А.** Микроструктура и радиационные характеристики сажевого золя в пламенах и антропогенных выбросах продуктов сгорания // *Изв. вузов. Проблемы энергетики.* 2013. № 5–6. С. 23–32.
7. **Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dодov I.R.** Measuring system for investigation spectra of gas media at high pressures // *J. Appl. Spectr.* 2016. V. 83. No. 3. P. 449–453.
8. **Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dодov I.R.** Spectral criogenic high-aperture multipass gaseous for investigation absorption of radiation by gaseous media // *J. Appl. Spectr.* 2016. V. 83. No. 5. P. 868–871.
9. **Moskalenko N.I., Ilin Ya.A., Sadykova M.S.** Investigation of the emission and absorption spectra of water vapor // *Rus. Phys. J.* 2015. V. 57. P. 1153–1158.