

Ю.Ю. Романенко, Ю.И. Булыгин, Т.А. Финоченко

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Аннотация. В статье рассматриваются особенности и сравнительные характеристики современных моделей радиационного теплопереноса, применяемых в физической теплотехнике. Актуальность исследования обусловлена сложностью математического описания процессов переноса энергии электромагнитными волнами. Целью исследования является анализ и систематизация существующих моделей радиационного теплообмена, выявление их преимуществ и ограничений для практического применения. Анализ пяти основных моделей: дискретной модели переноса излучения, радиационной модели, модели Росселанда, поверхностно-поверхностной модели и модели дискретных ординат. Для каждой модели рассмотрены: математический аппарат; область применения; преимущества и ограничения; особенности реализации. Систематизация знаний о моделях радиационного теплопереноса, что позволяет выбрать оптимальный метод расчета для конкретных инженерных задач.

Ключевые слова: радиационного теплообмена; модели теплообмена; тепловой поток

Для цитирования: Романенко, Ю. Ю. Особенности моделей радиационного теплопереноса / Ю. Ю. Романенко, Ю. И. Булыгин, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 154–161. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_154.

Введение.

Разработка адекватных моделей радиационного теплообмена представляет собой одну из наиболее сложных задач современной физической теплотехники. Это обусловлено фундаментальным отличием механизма переноса тепла излучением от теплопроводности и конвекции: энергия переносится электромагнитными волнами, не требуя материальной среды. Следовательно, математическое описание процесса неизбежно интегрирует законы термодинамики, оптики и квантовой механики, что рождает уникальные особенности применяемых моделей.

Краеугольным камнем любой модели является понятие спектральной интенсивности излучения, зависящей от координат, направления, частоты и времени. На этой основе выстраивается базовое уравнение переноса – интегро-дифференциальное уравнение, учитывающее ослабление интенсивности за счет поглощения и рассеяния, а также её усиление благодаря собственному излучению среды и приходящему рассеянному излучению со всех направлений. Непосредственное решение этого уравнения, точное даже в стационарном случае, сопряжено с колоссальными вычислительными затратами для реальных геометрий и широкого спектрального диапазона.

Основная часть.

Модельный расчет радиационной теплопередачи выполняется в тех случаях, когда величина лучистого теплового потока превышает значения тепловых потоков, обусловленных процессами конвекции или теплопроводности. Этот механизм наиболее характерен для условий высоких температур и подчиняется закону Стефана-Больцмана, согласно которому интенсивность излучения пропорциональна разнице четвертых степеней абсолютных температур излучающих поверхностей [1 - 3]. В силу этого ключевой особенностью моделирования становится поиск разумных упрощений, балансирующих между точностью и трудоемкостью. Первый уровень – это модели, основанные на радиационных свойствах системы. Здесь выделяется модель серого тела, пренебрегающая зависимостью свойств от

длины волны, что резко упрощает расчеты, но часто ведет к значительным погрешностям, особенно при больших градиентах температур. Более продвинутые спектральные модели, разбивающие диапазон на полосы или использующие узкополосные приближения, увеличивают точность ценой роста объема исходных данных и времени счета.

Обобщенная модель радиационной теплопередачи для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в положении и направлении описывается следующим уравнением:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega', \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – вектор положения; $\vec{s}$ – вектор направления; $\vec{s}'$ – вектор направления рассеяния; s – длина пути; a – коэффициент абсорбции газа; n – показатель преломления среды; σ_s – коэффициент рассеяния; σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$); I – интенсивность излучения; T – локальная температура газа; Φ – фазовая функция; Ω' – телесный угол; $(a + \sigma_s)$ – оптическая толщина или непрозрачность среды [4-6].

Рисунок 1 иллюстрирует процесс радиационного теплообмена в модели радиационной теплопередачи.

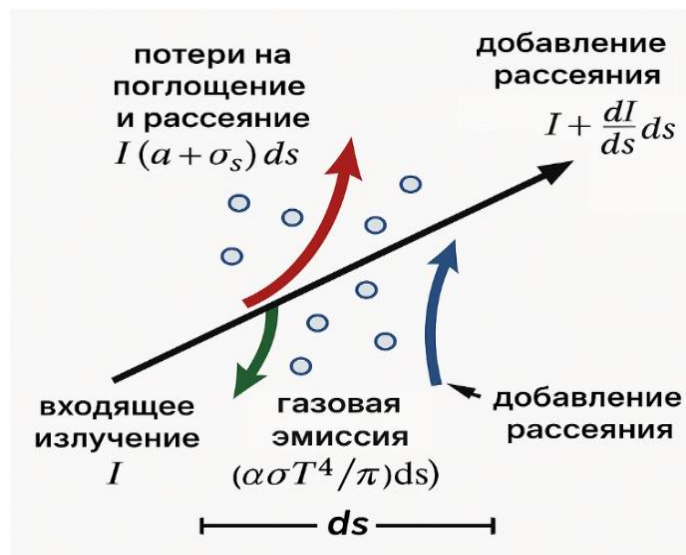


Рис. 1. Радиационный теплоперенос

Моделирование процессов нагрева поверхностей от радиации за счет искусственных источников тепла может производиться с помощью различных моделей излучения, которые рассмотрим более подробно [1, 5]:

1. *Дискретная модель переноса излучения (DTRM)* [4, 6]. Она обладает тремя ключевыми преимуществами: простотой реализации, гибкостью точности благодаря варьированию числа лучей и универсальностью применения в различных диапазонах оптической толщины среды. Однако при применении DTRM в программе ANSYS Fluent важно учитывать ряд ограничений:

- все поверхности предполагаются идеально диффузионными, равномерно распределяющими отражение падающего излучения;
- рассеяние излучения не принимается во внимание моделью;
- рассчитываются лишь спектры серого излучения;
- увеличение числа расчетных лучей значительно повышает требования к вычислительным ресурсам;
- модель несовместима с нестандартными сеточными интерфейсами, подвижными сетками и параллельными вычислениями.

При расчете распространения излучения в рамках DTRM используется следующее основное уравнение:

$$\frac{dI_s}{ds} = -\kappa I_s + \kappa n^2 I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I'_s \Phi(s', s) d\Omega', \quad (2)$$

где I_s – интенсивность излучения в направлении s , s – путь луча, κ – коэффициент поглощения, n – показатель преломления среды, I_b – интенсивность черного тела, σ_s – коэффициент рассеяния, $\Phi(s', s)$ – фазовая функция рассеяния, $d\Omega'$ – элементарный телесный угол.

Пространство разбивается на множество лучей, каждый из которых соответствует определённому направлению распространения излучения. Эти лучи проходят через всю расчётную область, пересекая контрольные объёмы (ячейки сетки). Интенсивность излучения интегрируется вдоль каждого луча, учитывая поглощение, рассеяние и излучение среды. Это позволяет рассчитать изменение интенсивности излучения по мере прохождения луча через среду. Основное уравнение переноса излучения решается для каждого луча, что позволяет учесть все виды взаимодействия излучения с окружающей средой. После того как интенсивность излучения рассчитана для всех лучей, проводится усреднение по всем направлениям, чтобы получить общий тепловой поток в каждой точке расчётной области.

2. *Радиационная модель P-1* [7]. Имеет ряд преимуществ перед моделью DTRM. Уравнение переноса излучения (1) преобразуется в уравнение диффузии, решение которого требует минимальных затрат процессорного времени. Дополнительно данная модель включает учет эффекта рассеяния излучения. Она подходит для анализа сложной геометрической формы объектов с использованием криволинейных координат и особенно полезна при исследовании сред с большой оптической плотностью, таких как процессы горения.

Интенсивность излучения разлагается в ряд по сферическим гармоникам, где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор положения, $\mathbf{a}$ – единичный вектор направления. В модели P-1 учитываются только первые две гармоники, соответствующие нулевой и первой степеням косинуса угла между направлением излучения и осью координат. Угловое распределение интенсивности излучения аппроксимируется линейной функцией, что приводит к упрощённой форме уравнения переноса излучения. Полученная система дифференциальных уравнений решается численно, что позволяет найти распределение температуры и плотности излучения в среде.

Основное уравнение переноса излучения в модели P-1 записывается следующим образом:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{3\kappa} \nabla G \right) = \kappa(G - 4\pi B), \quad (3)$$

где G – полный поток излучения, κ – коэффициент поглощения, B – интенсивность черного тела.

Применение модели излучения P-1 сопровождается определенными ограничениями:

- предполагается идеальная диффузность всех поверхностей;
- несмотря на возможность учета не серых спектров, необходимо отдельно вводить коэффициенты поглощения и спектральные характеристики стенок для каждой полосы спектра;
- в средах с низкой оптической плотностью возникают заметные погрешности при анализе сложных геометрических форм;
- локальные источники тепла могут приводить к завышению предсказанных значений радиационных потоков.

3. *Модель излучения Росселанда*. Выгодно выделяется среди ранее рассмотренных моделей двумя основными особенностями. Первая — высокая эффективность и низкая нагрузка на ресурсы процессора, поскольку в отличие от модели P-1 отсутствует необходимость решать дополнительную транспортную задачу для падающего излучения. Вторая особенность заключается в том, что применение данной модели целесообразно исключительно в средах с высоким значением оптической толщины ($\tau > 3$).

Основной принцип модели Росселанда заключается в том, чтобы упростить решение уравнения переноса излучения путём замены сложного спектрального коэффициента поглощения средним значением, называемым средней непрозрачностью Росселанда. Это позволяет рассматривать перенос излучения как аналог диффузионного процесса, что существенно упрощает математическое описание проблемы.

Средняя непрозрачность Росселанда определяется как взвешенное среднее обратных величин спектральной непрозрачности по всему спектру частот:

$$\kappa_R = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{\partial B_\nu}{\partial T} d\nu}{\int_0^\infty \frac{\partial B_\nu}{\partial T} d\nu}, \quad (4)$$

где κ_ν – спектральная непрозрачность на частоте ν , B_ν – функция Планка, описывающая спектр излучения абсолютно черного тела, T – температура среды.

Следует помнить, что использование модели Росселанда ограничено приложениями с решателями, основанными на давлении, и она не совместима с решателями, использующими плотность [6].

4. *Поверхностно-поверхностная модель излучения (S2S)* [4]. Данная модель отлично зарекомендовала себя в ситуациях, когда перенос излучения осуществляется непосредственно между поверхностями без участия промежуточной среды. Примеры включают системы космического теплообмена, солнечные коллекторы, инфракрасные отопительные приборы и автомобильные радиаторы. Здесь традиционные методы расчета часто оказываются неэффективными. По сравнению с методом дискретных ординат (DTRM), метод S2S обеспечивает значительное сокращение времени одной итерации, хотя общие затраты ресурсов процессора остаются высокими. Однако, если гранями поверхностей являются полигоны многогранных элементов сетки, время расчетов возрастает.

Основные ограничения поверхностно-поверхностной модели S2S:

- все поверхности принимаются абсолютно диффузными, равномерно отражающими падающую энергию;
- применяется только для расчета монохроматического («серого») излучения;
- метод не поддерживает обработку височных узлов и адаптивных изменений сетки вблизи излучающих границ;
- большое количество отдельных граней увеличивает нагрузку на процессор, однако объединение поверхностей в группы (кластеры) позволяет снизить этот недостаток.

Тепловой поток от элемента i к элементу j выражается следующей формулой:

$$Q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4), \quad (5)$$

где A_i – площадь элемента i , F_{ij} – фактор формы от элемента i к элементу j , σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_i и T_j – температуры элементов i и j соответственно.

Вся поверхность, участвующая в обмене излучением, делится на небольшие элементы (ячейки). Каждый элемент рассматривается как источник и приёмник излучения. Для каждого элемента рассчитывается фактор формы, который определяет долю излучения, приходящую от данного элемента к другим элементам. Факторы формы зависят от геометрии системы и взаимного расположения элементов. Для каждого элемента учитываются свойства поверхности, такие как степень черноты, отражательная способность и температура. На основе рассчитанных факторов формы и свойств поверхности составляется система уравнений, которая решается для нахождения теплового баланса каждого элемента.

5. *Модель дискретных ординат (DO)* [8]. Решение ищется для каждой выбранной ординаты, что трансформирует исходное уравнение в систему связанных дифференциальных уравнений. Главная особенность данной модели – появление так называемого «эффекта лучевания», артефакта, связанного с дискретизацией направлений, который может исказить результат в областях с резкими изменениями интенсивности. Пригодна для широкого спектра задач, охватывая различные уровни оптической толщины среды — от чисто поверхностного

излучения до глубокого проникновения излучения в условиях горения. Данная модель также эффективно описывает процессы передачи излучения сквозь частично прозрачные стенки. Ее основным преимуществом является умеренное потребление оперативной памяти.

Пространство направлений излучения разбивается на несколько дискретных углов (ординатов), каждое из которых соответствует определённому направлению распространения излучения. Таким образом, интенсивность излучения рассматривается как сумма вкладов от каждого из этих направлений. Интенсивность излучения интегрируется вдоль каждого луча, соответствующего выбранному углу, учитывая поглощение, рассеяние и излучение среды. Это позволяет рассчитать изменение интенсивности излучения по мере прохождения луча через среду. Основное уравнение переноса излучения решается для каждого выбранного угла, что позволяет учесть все виды взаимодействия излучения с окружающей средой. После того как интенсивность излучения рассчитана для всех углов, проводится усреднение по всем направлениям, чтобы получить общий тепловой поток в каждой точке расчётной области.

Основное уравнение переноса излучения, которое решается в рамках модели DO, выглядит следующим образом:

$$s_m \cdot \nabla I_m(r) + (\kappa + \sigma_s) I_m(r) = \kappa I_b(r) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{n=1}^N w_n \Phi(s_m, s_n) I_n(r), \quad (6)$$

где $I_m(r)$ – интенсивность излучения в направлении s_m в точке r , s_m – направление излучения, соответствующее m -му ординату, κ – коэффициент поглощения, σ_s – коэффициент рассеяния, $I_b(r)$ – интенсивность черного тела, $\Phi(s_m, s_n)$ – фазовая функция рассеяния, w_n – весовой коэффициент для n -го ордината, N – общее количество ординатов.

Модель может применяться как для расчетов серого, так и несерого излучения, используя концепцию серых полос. Точное решение задачи с мелкоступенчатым угловым распределением может потребовать значительных вычислительных усилий.

В ANSYS Fluent реализация моделирования несерого излучения основана на учете аспекта спектрального поглощения a_λ , который изменяется скачкообразно в различных спектральных диапазонах и остается практически постоянным внутри каждого диапазона. Например, стекло демонстрирует именно такое полосатое поведение. Несерое излучение в ANSYS Fluent поддерживается всеми методами, предназначенными для серого излучения. Это означает, что одновременно можно учитывать такие явления, как рассеяние, анизотропия, взаимодействие с полупрозрачными материалами и влияние частиц. Данный подход также допускает детализацию определения спектральной излучательной способности стенок, принимая её постоянной в пределах каждой спектральной полосы.

Отдельного внимания заслуживают модели, предназначенные для учета радиации в сочетании с другими видами теплообмена. В задачах горения, высокотемпературной газодинамики или при проектировании космических аппаратов излучающая способность частиц сажи, трехатомных газов или плазмы становится определяющей. Здесь модели радиационного переноса должны быть тесно связаны с моделями химической кинетики, турбулентности и течения реагирующей среды, требуя консистентного определения оптических свойств и температуры на каждом шаге итерационного процесса.

Заключение.

Поскольку в настоящей работе исследования проводятся как в теплый период года, так и в холодный, было принято решение использовать единую модель для описания поведения воздушной среды в кабине железнодорожного крана. Вследствие того, что при расчетах в охлаждающем микроклимате отсутствует радиационная составляющая, то и в нагревающем, теплоступления от солнечных лучей моделировались как процессы тепломассопереноса посредством задания температуры окружающей среды и температуры стенок кабины. Также причиной использования именно такой модели можно считать низкий процент остекления кабины, что говорит о том, что основная нагрузка на кабину возникает через непрозрачные конструкции.

Таким образом, выбор конкретной модели радиационного теплопереноса всегда представляет собой компромисс. Он определяется спектральной сложностью среды, оптической толщиной (от оптически тонких атмосфер до практически непрозрачных тел), геометрией задачи, доступными вычислительными ресурсами и, в конечном счете, требуемой точностью инженерного расчета. Развитие вычислительной техники и алгоритмов постепенно смещает этот баланс в сторону более точных и универсальных, но и более ресурсоемких моделей, открывая новые возможности для проектирования высокотемпературных систем будущего.

Список литературы

1. Верификация расчета процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX / Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – №. 2. – С. 226-232.
2. **Месхи, Б.Ч.** Математическое и экспериментальное моделирование процессов распространения 127 оксидов углерода и избытков теплоты в газозооушной среде помещения / Месхи Б.Ч., Маслов Е.И., Соловьёв А.Н., Булыгин Ю.И., Корончик Д.А. // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11. — № 6 (57). — С.862–874.
3. **Hanel B.** Beitrag zur Berechnung von Freistrahlenmiterhohten Anfangsturbulenz / Luft- und Kaltetechnik. — 1997. —Vol.4. — P. 193–197.
4. **Блох, А.Г.** Основы теплообмена излучением / Под ред. д-ра техн. наук проф. А.М. Гурвича. — Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. — 331 с.
5. **Бородина, Е.С.** Расчет систем кондиционирования воздуха с применением теплообменных аппаратов / Бородина, Е.С., Кочетов О.С. // Наука и современность. –2014. – № 27. – С. 147-152.
6. Bulygin Y.I., Koronchik D.A., Legkonogikh A.N., Zharkova M.G., Azimova N.N. Physical and theoretical models of heat pollution applied to cramped conditions welding taking into account the different types of heat // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. –Article 012015.
7. **Киселев, Н.В.** Моделирование процессов тепломаассопереноса на основе технологии ANSYS / Н.В. Киселев, В.М.

References

1. Verifikatsiya rascheta protsessa teploobmena v programmnom komplekse ANSYS CFX / Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.Ye. // Vestnik Ufimского gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – №. 2. – S. 226-232.
2. Meskhi, B.Ch. Mathematical and experimental modeling of the processes of propagation of 127 carbon oxides and excess heat in the gas-air environment of a room / Meskhi B.Ch., Maslov E.I., Soloviev A.N., Bulygin Yu.I., Koronchik D.A. // Bulletin of the Don State Technical University. - 2011. - Vol. 11. - No. 6 (57). - P.862-874.
3. **Hanel B.** Beitrag zur Berechnung von Freistrahlenmiterhohten Anfangsturbulenz / Luft- und Kaltetechnik. — 1997. —Vol.4. — P. 193–197.
4. **Bloch, A.G.** Fundamentals of Radiative Heat Transfer / Ed. by Doctor of Technical Sciences, Prof. A.M. Gurvich. — Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. — 331 p.
5. **Borodina, E.S.** Calculation of air conditioning systems using heat exchangers / Borodina, E.S., Kochetov O.S. // Science and Modernity. - 2014. - No. 27. - P. 147-152.
6. Bulygin Y.I., Koronchik D.A., Legkonogikh A.N., Zharkova M.G., Azimova N.N. Physical and theoretical models of heat pollution applied to cramped conditions welding taking into account the different types of heat // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. –Article 012015
7. **Kiselev, N.V.** Modeling of heat and mass transfer processes based on ANSYS technology / N.V. Kiselev, V.M. Karavaikov

Каравайков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9-10. – С. 20-26.1950.

8. **Лепеш, Г.В.** Моделирование процесса тепломассопереноса в программной среде Ansys/Fluent при дифференцированном отоплении подземного перехода / Г.В. Лепеш, Т.В. Потемкина, Г.А. Спроге // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 4(34). – С. 41-48.

// News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2012. - No. 9-10. - P. 20-26.1950.

8. **Lepesh, G.V.** Modeling of heat and mass transfer process in the Ansys/Fluent software environment for differentiated heating of an underground passage / G.V. Lepesh, T.V. Potemkina, G.A. Sproge // Technical and technological problems of service.– 2015. – No. 4(34). – P. 41-48.

Yu. Yu. Romanenko, Yu. I. Bulygin, T. A. Finochenko

FEATURES OF RADIATION HEAT TRANSFER MODELS

Abstract. This article examines the features and comparative characteristics of modern radiative heat transfer models used in physical heat engineering. The relevance of this study is due to the complexity of the mathematical description of energy transfer processes by electromagnetic waves. The aim of this study is to analyze and systematize existing radiative heat transfer models, identifying their advantages and limitations for practical application. Five main models are analyzed: the discrete radiative transfer model, the radiation model, the Rosseland model, the surface-to-surface model, and the discrete ordinate model. For each model, the following are considered: mathematical apparatus; scope of application; advantages and limitations; and implementation features. This article systematizes knowledge of radiative heat transfer models, enabling the selection of the optimal calculation method for specific engineering problems.

Keywords: radiative heat transfer; heat transfer models; heat flux

For citation: Romanenko, Yu. Yu. Features of radiative heat transfer models / Yu.Yu. Romanenko, Yu.I. Bulygin, T.A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – No. 4. – P. 154–161. - DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_154.

Сведения об авторах

Романенко Юлия Юрьевна

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант
e-mail: romanenko.iulya@yandex.ru

Бulygin Юрий Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
доктор технических наук, профессор
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

Information about the authors

Romanenko Yulia Yuryevna

Rostov State Transport University,
Chair «Life safety»,
Postgraduate Student
e-mail: romanenko.iulya@yandex.ru

Bulygin Yuri Igorevich

Rostov State Transport University,
Professor, Department of Life Safety,
Doctor of Engineering Sciences, Professor
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

Финоченко Татьяна Анатольевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
заведующий кафедрой,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: fta09@bk.ru

Finochenko Tatiana Anatolyevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Head of the Department, Candidate of
Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: fta09@bk.ru