

№ 1160

МИСиС

И.А. Прибытков

Теплообмен излучением

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1160

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра теплофизики и экологии металлургического
производства

И.А. Прибытков

Теплообмен излучением

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению Металлургия

УДК 536.2
П75

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *Т.И. Овчинникова*

Прибытков И.А.

П75 Теплообмен излучением: Учеб. пособие. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 98 с.

Рассмотрены физические основы переноса теплоты излучением и особенности излучения абсолютно черного, серого и реальных тел. Проанализированы радиационные свойства поверхностей и газовых объемов, участвующих в теплообмене излучением, и их влияние на интенсивность переноса теплоты. Изложены особенности излучения газовых и запыленных сред, влияние формы, размеров и взаимного расположения твердых поверхностей на результат теплообмена. Рассмотрены методы расчета теплообмена излучением в замкнутых системах как с лучепрозрачной, так и с поглощающей и излучающей средой.

Пособие предназначено для студентов бакалавриата направления 150100 «Металлургия» и может быть полезно студентам, обучающимся по другим направлениям.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
1. Теплофизические основы теплообмена излучением	5
1.1. Основные понятия и определения	5
1.2. Количественные характеристики процесса излучения	7
1.3. Виды лучистых потоков	11
1.4. Основные законы излучения абсолютно черного тела	16
1.5. Понятие серого тела и степень черноты серого тела	22
1.6. Закон Кирхгофа для излучения серого тела	25
1.7. Применение законов излучения а.ч.т. для расчетов излучения серых и реальных тел	27
Контрольные вопросы	29
2. Теплообмен излучением в системах с лучепрозрачной средой	30
2.1. Виды угловых коэффициентов излучения	30
2.2. Основные свойства средних угловых коэффициентов излучения ...	36
2.3. Постановка задачи расчета теплообмена излучением	41
2.4. Интегральное уравнение радиационного теплообмена в системах с лучепрозрачной средой	42
2.5. Зональный метод решения задач теплообмена излучением в системах с лучепрозрачной средой	44
2.6. Примеры решения задач теплообмена излучением в замкнутых системах с лучепрозрачной средой	49
Контрольные вопросы	58
3. Теплообмен излучением в системах с излучающей и поглощающей средой	60
3.1. Особенности излучения газов и запыленных сред	60
3.2. Спектральные радиационные характеристики газа и газовых объемов	63
3.3. Интегральные радиационные характеристики газового объема	70
3.4. Обобщенные угловые коэффициенты излучения	75
3.5. Классический зональный метод расчета теплообмена излучением в системах с поглощающей и излучающей средой	79
3.6. Примеры решения задач теплообмена излучением в замкнутых системах с поглощающей и излучающей средой	81
3.7. Коэффициент теплоотдачи излучением	84
Контрольные вопросы	85
Библиографический список	86
Приложение	87

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопросы выбора наиболее рациональных источников тепловой энергии, сбережения полученной теплоты при реализации технологических процессов в настоящее время выходят на первый план как в научной, так и в практической областях деятельности человеческого общества. От решения этих вопросов во многом зависит экологическая безопасность человека и природы.

В технических устройствах технологического назначения имеет место неравномерность распределения температуры по объему зоны технологического процесса, что приводит к появлению процессов переноса теплоты. От того, как организованы эти процессы, зависит эффективность работы технологического оборудования и вследствие этого качество готовой продукции и затраты энергии на ее производство.

Как известно, существует три механизма переноса теплоты: молекулярная теплопроводность, конвективный теплообмен (в технических приложениях главным образом конвективная теплоотдача) и теплообмен излучением. Эти три механизма работают всегда вместе, и только конкретные условия могут привести к доминированию того или иного механизма или способа переноса теплоты как рабочего вида энергии.

Теплообмен излучением (или радиационный теплообмен) имеет свои, только ему присущие особенности, что существенно отличает его от остальных двух. Теория теплообмена излучением базируется на законах излучения идеализированных тел – абсолютно черного и серого, которых в природе нет. Радиационные свойства реальных тел существенно отличаются от таковых для абсолютно черного и серого тел. Интенсивность процесса переноса теплоты излучением более чувствительна к такому важнейшему фактору, как температурный уровень технологического процесса. Перенос теплоты излучением предполагает превращение тепловой энергии в энергию электромагнитных волн и наоборот при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом.

Знание основных законов излучения абсолютно черного тела, радиационных свойств серого и реальных тел, умение применять и использовать эти законы и свойства при анализе и расчете теплообмена излучением создают возможность управления этим процессом, формирования фундаментальной базы для расчета, проектирования, пуска и эксплуатации технологического оборудования.

В данном учебном пособии особое внимание уделяется анализу физической сущности процесса переноса теплоты излучением, его описанию и в меньшей степени методике расчета. Следует особо отметить, что пособие нельзя рассматривать как материал, в котором рассматриваются инженерные методы расчета теплообмена излучением.

1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

1.1. Основные понятия и определения

Теплообмен излучением является одним из трех способов переноса теплоты в промышленных установках. Знание особенностей переноса энергии излучением играет важную роль в таких областях науки и техники, как медицина, биология, приборостроение, инфракрасная техника, пищевая промышленность, самолето- и ракетостроение, металлургия, машиностроение и т.д. В учебной, научной, производственно-технической литературе используются и другие названия этого способа переноса энергии: лучистый теплообмен, радиационный теплообмен и др.

Теплообмен излучением является своеобразным способом переноса теплоты, во многом отличающимся от рассмотренных выше способов переноса теплоты теплопроводностью и конвекцией.

Одним из основополагающих принципов теории теплообмена излучением является утверждение: любое реальное тело (твердое, жидкое, газообразное), температура которого отличается от абсолютного нуля, излучает электромагнитные колебания различной длины волны или различной частоты. Теория теплообмена излучением, в отличие от физики, не рассматривает механизм излучения электромагнитных колебаний и взаимодействие электромагнитных волн с веществом; она оперирует макрофизическими, суммарными или результирующими эффектами этого взаимодействия. Например, в теории теплообмена излучением считается, что процессы взаимодействия электромагнитных волн с твердыми и жидкими телами сосредоточены в очень тонком поверхностном слое вещества. Исключением являются газы, которые вследствие своей малой плотности излучают энергию всем объемом.

Суммарный процесс теплообмена излучением между телом 1 и телом 2 состоит из трех последовательных процессов: первый – превращение тепловой энергии тела 1 в энергию электромагнитных волн; второй – перенос энергии в пространстве в форме энергии электромагнитных волн от тела 1 к телу 2; третий – превращение энергии электромагнитных волн в тепловую энергию тела 2. Разумеется, эта схема справедлива и в направлении от тела 2 к телу 1. Заме-

тим пока, что никаких предположений о соотношениях температур двух рассмотренных тел не делается.

Таким образом, теплообмен излучением включает в себя как процесс превращения энергии, так и процесс переноса энергии в пространстве.

Излучение твердых и жидких тел сложного химического состава (металлические сплавы, полупроводники, диэлектрики, окисленные металлы, огнеупорные материалы и т.д.) осуществляется в широком диапазоне длин волн, при этом спектр излучения является непрерывным или сплошным. Чистые металлы и газы излучают энергию или в узкой области длин волн, или на строго определенных длинах, или в определенных полосах длин волн. Спектр излучения таких веществ является линейчатым или полосчатым; между полосами излучения существуют окна прозрачности, т.е. области длин волн, на которых энергия не излучается. В этом случае говорят, что излучение носит селективный, или избирательный характер.

Теория теплообмена рассматривает термин *излучение* как совокупность электромагнитных волн различной длины или фотонов различной частоты, распространяющихся в пространстве и способных взаимодействовать с веществом различного агрегатного состояния. В данном учебном пособии рассматривается только *тепловое излучение* – излучение, источником энергии которого является возбуждение тепловым движением атомов, молекул, электронов вещества. Энергия теплового излучения имеет такую же размерность, как и другие формы энергии; единицей измерения ее является 1 джоуль: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Энергия теплового излучения в общем случае может переходить в различные формы энергии. В данном случае рассматривается только основная форма превращения – переход энергии излучения в форму теплового хаотического движения атомов и молекул и, соответственно, обратный процесс – переход внутренней энергии частиц в энергию излучения. Таким образом, энергия в форме энергии электромагнитного излучения существует только в пространстве между телами до момента взаимодействия электромагнитных волн с веществом.

Перенос теплоты излучением существенно отличается от переноса теплоты теплопроводностью и конвекцией. Последние два процесса имеют место только при непосредственном контакте молекул или атомов в случае теплопроводности, а также контакте потока газа или жидкости с поверхностью другой фазы (твердой или жидкой) в случае конвективного теплообмена. В процессе теплообмена излуче-

нием два тела могут обмениваться теплотой, если они отделены друг от друга в пространстве и даже если между ними абсолютный вакуум. В пределе, если два твердых тела, отдаленных друг от друга, привести в соприкосновение, будет иметь место теплообмен уже не излучением, а контактной теплопроводностью. Два тела непосредственно обмениваются теплотой в случае теплообмена излучением при условии, если они «видят» друг друга, т.е. если между ними отсутствует третье непрозрачное тело. Особенностью теплообмена излучением является и то, что два тела обмениваются теплотой и в том случае, если их температуры одинаковы. Как известно, перенос тепла теплопроводностью или конвекцией возникает только при наличии разности температур между двумя точками тела или между движущейся жидкостью и, например, твердой поверхностью.

В зависимости от длины волны излучение классифицируется следующим образом: ультрафиолетовое ($\lambda = 0,05 \dots 0,4$ мкм); световое (видимое) ($\lambda = 0,4 \dots 0,76$ мкм); инфракрасное ($\lambda = 0,76 \dots 1000$ мкм).

Тепловому излучению соответствует область длин волн $\lambda = 0,4 \dots 25$ мкм. Если энергия излучается на всех длинах волн от 0 до ∞ , то такое излучение называется *суммарным*, или *интегральным*; в противоположность ему излучение на одной длине волны λ или в узком диапазоне длин волн $d\lambda$ называется *спектральным*, или *монокроматическим*.

В зависимости от направления излучения различают *сферическое* и *направленное* излучение. Все реальные тела излучают энергию по всем направлениям сферы (или полусферы), такое излучение называется *сферическим* (полусферическим). Излучение, рассматриваемое в каком-либо одном направлении или в пределах бесконечно малого телесного угла $d\omega$, называется *направленным*. Если интенсивность излучения одинакова по всем направлениям сферы (или полусферы), то такое излучение называется *изотропным* или *диффузным*. Термин «полусфера» используется при анализе теплообмена излучением между телами с плоскими поверхностями. Разумеется, и сферическое, и направленное излучение может быть как интегральным, так и спектральным.

1.2. Количественные характеристики процесса излучения

Как уже было отмечено, в процессе теплообмена излучением от одного тела к другому переносится определенное количество энер-

гии или теплоты Q_{Σ} , Дж. На самом деле реальные системы, в которых имеет место теплообмен излучением, состоят более чем из двух тел. Например, внутреннее рабочее пространство печи для нагрева металла под прокатку или другие виды обработки металла давлением в простейшем случае можно рассматривать как систему, состоящую из боковых стен печи, подины, свода, поверхности нагреваемого металла и объема излучающего газа. В этом случае суммарное количество теплоты Q_{Σ} можно рассматривать по-разному. Например, как количество теплоты, переданной металлу только от объема излучающего газа, или только от свода, или от всех внутренних поверхностей рабочего пространства и т.д.

Интенсивность процесса переноса энергии излучением характеризуется *потоком* энергии излучения Q , Вт, и *плотностью потока* энергии излучения q , Вт/м².

Поскольку в конечном счете в процессе теплообмена излучением тела обмениваются энергией в виде теплоты, в дальнейшем вместо термина «энергия» будем использовать, где это возможно, термин «теплота».

Потоком энергии излучения называется количество теплоты, переносимой через некоторую поверхность F , м², за единицу времени по всем направлениям полусферы:

$$Q = Q_{\Sigma} / t,$$

где t – время процесса, с.

При практических расчетах используют следующие соотношения:

$$1 \text{ Дж} = 2,3884 \cdot 10^{-4} \text{ ккал} = 2,7778 \cdot 10^{-7} \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 9,479 \cdot 10^{-4} \text{ БТЕ};$$

$$1 \text{ ккал} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 1,1630 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,968 \text{ БТЕ};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6000 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 8,5984 \cdot 10^2 \text{ ккал} = 3,412 \cdot 10^3 \text{ БТЕ};$$

$$1 \text{ БТЕ} = 1,055 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 0,2520 \text{ ккал} = 2,931 \cdot 10^{-4} \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 0,8958 \text{ ккал/ч} = 3,4098 \text{ БТЕ/ч};$$

$$1 \text{ ккал/ч} = 1,1630 \text{ Вт} = 3,9656 \text{ БТЕ/ч};$$

$$1 \text{ БТЕ/ч} = 0,2933 \text{ Вт} = 0,2522 \text{ ккал/ч}.$$