

№ 1705

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ  
Технологический университет



Кафедра теплофизики и экологии металлургического производства

**В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц**

## **ТЕПЛОТЕХНИКА**

*Теоретические основы расчетов печей*

**Учебно-методическое пособие**  
для студентов всех специальностей  
направления «Металлургия»

*Под редакцией В.А. Кривандина*

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом института

УДК 621.771:669.041(03)

Г 96

Г 96 *В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц.* Теплотехника: Теоретические основы расчетов печей: Учеб.-метод. пособие / Под. ред. В.А. Кривандина – М.: МИСиС, 2002.– 80 с.

Даны теоретические основы расчетов печей: теплопередачи, нагрева и охлаждения тел, сгорания топлива, механики газов.

Рассмотрен теплообмен излучением в системе твердых тел в лучепрозрачных и излучающих газовых средах применительно к рабочему пространству печей. Для теплообмена конвекцией приведены формулы и графики для свободного движения и различных вариантов принудительного движения сред.

Рассмотрены вопросы нагрева и охлаждения теплотехнически тонких и массивных тел различной формы.

Формулы расчетов сгорания газообразного топлива даны для полного и неполного сгорания, а также для сгорания в обогащенном кислороде воздухе.

Дана методика гидравлических расчетов трактов, потерь на трение и местные сопротивления.

Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании.

© Московский государственный  
институт стали и сплавов  
(Технологический университет)  
(МИСиС), 2002

*ГУСОВСКИЙ Виктор Львович*  
*ЛИФШИЦ Адольф Ефимович*

## **ТЕПЛОТЕХНИКА**

*Теоретические основы расчетов печей*

**Учебно-методическое пособие**

для дипломного и курсового проектирования

Рецензент доц. *В.М. Клемперт*

Редактор *Л.М. Цесарская*

Компьютерная верстка *Т.Д. Насуцновой*

ЛР № 020777 от 13.05.98

---

Подписано в печать 30.01.02	Бумага офсетная	
Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Печать офсетная	Уч.-изд. л. 4,88
Рег. № 512	Тираж 300 экз.	Заказ 1071

---

Московский государственный институт стали и сплавов,  
119991, Москва, Ленинский пр-т, 4

Издательство «Учеба» МИСиС  
117419, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9  
Тел.: 954-73-94, 954-19-22

Отпечатано в типографии Издательства «Учеба» МИСиС,  
117419, Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9  
ЛР №01151 от 11.07.01

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
1. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ .....	5
1.1. Основные закономерности процесса излучения и свойства тел при теплообмене излучением .....	5
1.2. Теплообмен в системе твердых тел, разделенных лучепрозрачной средой .....	6
1.3. Теплообмен в системе с излучающим газовым телом .....	8
1.4. Теплообмен излучением в рабочем пространстве пламенной печи .....	14
1.5. Излучение через отверстия .....	15
2. ТЕПЛООБМЕН КОНВЕКЦИЕЙ .....	17
2.1. Основные закономерности теплообмена конвекцией .....	17
2.2. Свободное движение .....	21
2.3. Принудительное движение среды при продольном обтекании поверхности .....	24
2.4. Поперечное обтекание пучков труб .....	31
2.5. Поперечное обтекание плоских поверхностей равномерным потоком .....	33
2.6. Струйная обдувка .....	36
3. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕЛ .....	39
3.1. Теплотехнически тонкие и массивные тела .....	39
3.2. Варианты расчета нагрева и охлаждения тел .....	41
3.3. Расчет нагрева и охлаждения теплотехнически тонких тел .....	42
3.3.1. Расчет при теплообмене по закону конвекции .....	42
3.3.2. Расчет при теплообмене по закону излучения .....	43
3.4. Расчет нагрева и охлаждения теплотехнически массивных тел .....	45
3.4.1. Расчет при постоянной температуре окружающей среды и равномерном начальном распределении температур .....	45
3.4.2. Расчет при линейном изменении температуры окружающей среды и равномерном начальном распределении температур .....	50
3.4.3. Расчет при неравномерном начальном распределении температур .....	53
3.4.4. Нагрев и охлаждение тел сложной формы .....	58
4. РАСЧЕТЫ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА .....	60
4.1. Расчеты полного сгорания газообразного топлива .....	60
4.2. Расчеты неполного сгорания газообразного топлива .....	67
4.3. Расчеты сгорания газообразного топлива в обогащенном кислородом воздухе .....	70
4.4. Расчет воспламенения газов и взрывобезопасности рабочего пространства печей .....	72
5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТРАКТОВ .....	75
5.1. Потери давления на трение .....	76
5.2. Потери давления на местные сопротивления .....	78
5.3. Геометрическое давление .....	79
Библиографический список .....	80

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание современных печных агрегатов невозможно без проведения предварительных теплотехнических и гидравлических расчетов. Основные расчеты, которые необходимо выполнять в процессе курсовых и дипломных работ, это расчеты теплообмена излучением и конвекцией, нагрева и охлаждения материала, сгорания топлива, гидравлические расчеты трасс. Методика таких расчетов разработана для широкого диапазона практических задач, поэтому в данном пособии рассмотрены только наиболее распространенные случаи расчетов: теплообмен излучением в системе твердых тел, разделенных лучепрозрачной или излучающей газовой средой, часто встречающиеся виды свободной и принудительной конвекции, нагрев теплотехнически тонких и массивных твердых тел, полное и неполное сгорание газообразного топлива, а также сгорание топлива в воздухе, обогащенном кислородом, пределы воспламенения газовых смесей, гидравлические расчеты газо-, воздухо- и дымопроводов. В более сложных случаях необходимо обращаться к специальной литературе, например к справочнику «Расчет нагревательных и термических печей» (М.: Metallургия, 1983).

Объем пособия не позволяет поместить в нем многие необходимые для расчетов вспомогательные материалы, такие как физические, теплофизические и оптические свойства веществ, угловые коэффициенты, коэффициенты местных сопротивлений и др. Эти материалы можно также найти в специальной литературе.

# 1. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

## 1.1. Основные закономерности процесса излучения и свойства тел при теплообмене излучением

Тепловой поток, Вт, излучаемый поверхностью серого тела в окружающее пространство в пределах полусферического телесного угла (собственное излучение тела), определяется в соответствии с законом Стефана – Больцмана:

$$Q = C_s \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4 F = C_s \varepsilon \left( \frac{t + 273}{100} \right)^4 F, \quad (1.1)$$

где  $C_s = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$F$  – площадь излучающей поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$t(T)$  – температура тела,  $^\circ\text{C}$  (К);

$\varepsilon$  – степень черноты тела.

При теплообмене между поверхностями 1 и 2 на поверхность 2 попадает часть полного теплового потока, излучаемого поверхностью 1 и наоборот. Эта часть характеризуется средним угловым коэффициентом излучения

$$\varphi_{12} = Q_{12} / Q_1, \varphi_{21} = Q_{21} / Q_2, \quad (1.2)$$

где  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{21}$  – средние угловые коэффициенты излучения от поверхности 1 на поверхность 2 и наоборот;

$Q_{12}$  и  $Q_{21}$  – тепловые потоки, излучаемые поверхностью 1 на поверхность 2 и наоборот, Вт;

$Q_1$  и  $Q_2$  – полные тепловые потоки, излучаемые поверхностями 1 и 2 по всем направлениям в пределах полусферического телесного угла, Вт.

Величина средних угловых коэффициентов излучения зависит от геометрической ориентации поверхностей относительно друг друга.

Для нахождения угловых коэффициентов излучения наиболее часто используют следующие свойства угловых коэффициентов.

*Свойство замыкаемости:* если между одним из тел замкнутой системы происходит теплообмен излучением со всеми другими телами, то сумма угловых коэффициентов излучения этого тела на все тела, образующие замкнутую систему, равна единице, т.е.

$$\varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + \dots + \varphi_{1n} = 1 \quad (1.3)$$

*Свойство взаимности:* если между двумя телами происходит теплообмен излучением, то угловые коэффициенты излучения обратно пропорциональны поверхностям тел, т.е.

$$\varphi_{12} / \varphi_{21} = F_2 / F_1 \text{ и } F_1 \varphi_{12} = F_2 \varphi_{21}. \quad (1.4)$$

## 1.2. Теплообмен в системе твердых тел, разделенных лучепрозрачной средой

При рассмотрении теплообмена в системе твердых тел считаем заданными температуры этих тел, а искомыми – результирующие тепловые потоки, т.е. тепло, поглощаемое или излучаемое телами за единицу времени в результате теплообмена. Все тела считаем серыми, однако в пределе они могут быть и абсолютно черными ( $\varepsilon = 1, 0$ ).

Для определения результирующего теплового потока  $i$ -го тела  $Q_i$  в системе из  $n$  тел необходимо решить систему уравнений

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} Q_i + C_s Q_j F_j \right) \varphi_{ji} - C_s \varepsilon_i Q_i F_i \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (1.5)$$

Вместо одного из уравнений можно использовать уравнение теплового баланса

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0. \quad (1.6)$$

Для тел, поглощающих тепло, результирующий тепловой поток имеет положительное значение, для тел, отдающих тепло, – отрицательное.

В случае замкнутой системы из двух твердых тел, разделенных лучепрозрачной средой, решение системы уравнений (1.5) для тела  $I$  имеет вид

$$Q_1 = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] F_1, \quad (1.7)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения системы, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), определяемый по формуле

$$C_{\text{пр}} = C_s \varepsilon_{\text{пр}} = C_s \frac{\Phi_{12}}{1 + \left( \frac{1}{\varepsilon_1 - 1} \right) \Phi_{12} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2 - 1} \right) \Phi_{21}}, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы.

Для тел с высокой степенью черноты при практических расчетах можно использовать упрощенное выражение для приведенного коэффициента излучения системы:

$$C_{\text{пр}} = C_s \varepsilon_1 \varepsilon_2. \quad (1.9)$$

Если в теплообмене двух тел участвует третье тело, являющееся адиабатным, для которого результирующий поток равен нулю (например, огнеупорная футеровка), причем все три тела образуют замкнутую систему, то результирующий тепловой поток также можно определить по формуле (1.7), а приведенный коэффициент излучения системы – по формуле (1.8), заменяя значения угловых коэффициентов излучения  $\varphi_{ij}$  на  $\varphi_{ij}^{\text{общ}}$ . Угловой коэффициент излучения  $\varphi_{ij}^{\text{общ}}$  учитывает отражение тепла от адиабатной поверхности и в общем случае может быть рассчитан по формуле

$$\varphi_{ij}^{\text{общ}} = \varphi_{ij} + \left( \frac{\varphi_{ik} \varphi_{kj}}{\varphi_{kj} + \varphi_{ik}} \right), \quad (1.10)$$

где  $k$  – адиабатное тело.