



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В производстве большинства видов строительных материалов и изделий важнейшая роль принадлежит тепловым процессам, реализуемым в печах различного технологического назначения. Поэтому теплотехнические дисциплины являются неотъемлемой частью учебных планов подготовки бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Строительство».

Учебное пособие включает три части: часть I «Техническая термодинамика», часть II «Основы теплообмена», часть III «Тепловая работа печей».

В первой части пособия (главы 1–4) приводятся сведения, составляющие основу технической термодинамики. Прежде всего, раскрывается содержание параметров, характеризующих состояние термодинамической системы. Их последующее использование облегчает восприятие физической природы тепловых процессов, формализованных в виде законов термодинамики.

Изложение сведений о термодинамических циклах ограничено рассмотрением классического цикла Карно. В то же время детально рассматривается термодинамика газовых потоков. В особенности вопросы, связанные с расчетом параметров истечения газовых сред, в том числе — с применением газодинамических функций, широко используемых в инженерных расчетах.

Вторая часть пособия (главы 5–8) посвящена рассмотрению процессов теплообмена, протекающих в промышленных печах. В доступной форме излагаются сведения,

раскрывающие физическую природу теплопереноса. При этом основное внимание акцентируется на решении прикладных задач теплообмена. Для кондуктивного теплообмена к таким задачам относится расчет потерь теплоты через плоскую и цилиндрическую многослойную футеровку печей при различных способах задания граничных условий.

Решение задач конвективного теплообмена базируется на применении критериальных уравнений. Рассмотренные примеры конвективной теплоотдачи отражают специфику этого вида теплообмена в промышленных печах.

При изложении основ радиационного теплообмена, наряду с основными законами излучения, большое внимание уделяется определению радиационных и оптико-геометрических характеристик тел и сред. Данные параметры используются в известных методах расчета лучистого теплообмена в промышленных печах. Детально рассмотрены частные случаи радиационного теплообмена, характеризующие прикладные задачи расчета применительно к установке тепловых агрегатов.

Третья часть пособия (главы 9–12) в определенной мере является оригинальной. Ее содержание отражает современный подход к конструированию промышленных печей, технические показатели которых должны соответствовать мировому уровню эффективности. Приводимые методики расчета закрепляются примерами, каждый из которых представляет собой один из аспектов такого емкого понятия, как тепловая работа печей.

Принятая в пособии последовательность изложения материала обеспечивает преемственность получаемых знаний. Она заключается в том, что физическая сущность тепловых процессов и их общая математическая формализация излагаются в разделе технической термодинамики. Последующая детализация способов передачи теплоты раскрывается в основах теплообмена. Прикладное значение основ теплотехники закрепляется в разделе тепловой работы печей.

Следует отметить, что содержание учебного пособия может быть полезно для студентов, обучающихся по специальностям «Технология вяжущих материалов и строи-

тельных изделий», «Технология стекла» и «Химическая технология керамики и огнеупоров» при изучении дисциплин: «Основы проектирования тепловых агрегатов», «Техническая термодинамика и теплотехника», «Тепловые процессы в производстве стекла и эмали» и др.

Автор выражает глубокую благодарность кафедре оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) и лично заведующему кафедрой, профессору, доктору технических наук Р. Ш. Абиеву, а также профессору, доктору технических наук А. П. Скуратову за ценные замечания и пожелания, высказанные в процессе рецензирования учебного пособия.

Замечания и пожелания по книге можно направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, Институт материаловедения и металлургии.



## **ВВЕДЕНИЕ**

В общем случае любой технологический процесс можно представить как преодоление сил, препятствующих его осуществлению. Для этого должна быть совершена работа с затратой определенного количества энергии. В тепловых агрегатах рабочим видом энергии является теплота.

Основу тепловой работы печей составляют процессы генерации тепловой энергии, ее преобразования и передачи обрабатываемому материалу или изделиям. Совокупность указанных процессов составляет содержание общетехнической дисциплины «Теплотехника», теоретическими разделами которой являются техническая термодинамика и теория теплообмена.

В производстве строительных материалов и изделий принципиальное значение имеет рациональное использование тепловой энергии в технологических целях. Ее потребление должно соответствовать современным параметрам энергоэффективности технологических процессов. Поэтому значительный объем учебного пособия посвящен изложению методов расчета тепловой работы печей, а также теплообменных аппаратов, используемых для регенерации теплоты продуктов сгорания топлива. Кроме того, большое внимание уделено разработке энергоэффективной структуры печных ограждений, применение которой обеспечивает повышение тепловой экономичности печей и их межремонтного периода.

Понятно, что теплотехническая подготовка студентов должна учитывать специфику их последующей профес-

сиональной деятельности. Поэтому объем и структура знаний в области технической термодинамики, теплообмена и тепловой работы печей должны соответствовать тому уровню, который обеспечивает понимание физической сущности изучаемых явлений с минимальным применением математического аппарата для их формализации. При таком подходе представляется возможным ограничить объем учебного пособия, а его содержание адаптировать с трудоемкостью освоения дисциплин, предусмотренной их рабочими программами. При этом у студентов сохраняется возможность более углубленного самостоятельного изучения отдельных разделов темы с использованием специальной учебной литературы.



ЧАСТЬ I

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА



## ГЛАВА 1

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

*Термодинамика* — это наука о наиболее общих свойствах макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, а также о процессах перехода между этими состояниями. Техническая термодинамика изучает закономерности превращения энергии в процессах, происходящих в макроскопических системах и сопровождающихся тепловыми эффектами. Вместе с теорией теплообмена она является теоретическим фундаментом теплотехники.

Физические свойства макроскопических систем изучаются статистическим и термодинамическим методами. Статистический метод, использующий теорию вероятностей и модели систем, представляет собой содержание статистической физики. Термодинамический метод является феноменологическим, так как рассматривает явления в целом без проникновения в структуру вещества. Основные выводы термодинамики получаются методом дедукции, используя только два эмпирических закона термодинамики. В то же время применение термодинамического метода не исключает обращения к молекулярно-кинетическим представлениям о структуре вещества.

## 1.1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

*Термодинамическая система* представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и с внешними телами. *Система* (целое, составленное из частей) формируется в соответствии с решаемой задачей. Все, что не включено в систему, но может взаимодействовать с ней, является *окружающей средой*. При решении технических задач в качестве системы выбирают макроскопическое тело, состоящее из большого числа частиц. Такую систему принято называть *рабочим телом*. Оно может состоять из одного или нескольких веществ, называемых *компонентами*.

Реальное рабочее тело может представлять собой *гомогенную* или *гетерогенную* систему. Система, состоящая из одной фазы вещества и имеющая одинаковые физические свойства во всех своих частях, называется *гомогенной* (однородной). Система, не отвечающая этому требованию, является *гетерогенной* (неоднородной). Под *фазой* понимается совокупность всех гомогенных частей системы, которые при отсутствии взаимодействий с окружающей средой являются физически однородными. Понятие фазы может не совпадать с понятием агрегатного состояния вещества (твердого, жидкого, газообразного, плазменного). В пределах одного и того же агрегатного состояния вещество может иметь несколько фаз.

*Термодинамическая система* — физическая система, способная обмениваться с окружающей средой энергией и веществом. Система отделяется от окружающей среды реальной или мысленной границей — *контрольной поверхностью*. В зависимости от свойств этой поверхности термодинамические системы подразделяются на *изолированные* (замкнутые) и *открытые* системы. Изолированные системы не обмениваются с окружающей средой ни энергией, ни веществом. Открытые системы могут обмениваться с окружающей средой не только энергией, но и веществом. Система, которая не может обмениваться с окружающей средой теплотой, называется *термически изолированной*, или *адиабатной*.

## 1.2. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

Взаимодействие рабочего тела с окружающей средой характеризуется изменением его макропараметров, поддающихся прямому измерению. Физические величины, свойственные конкретному состоянию рабочего тела, подразделяются на *интенсивные* и *экстенсивные* (аддитивные). Первые из них, например, температура и давление, не зависят от количества вещества в системе. Вторые, например, объем, энергия системы и масса составляющих ее компонентов, изменяются пропорционально величине системы. Все удельные (отнесенные к единице вещества) параметры относятся к интенсивным величинам. Следует отметить, что некоторые интенсивные величины, например, удельная теплота, не являются макропараметрами системы.

*Параметры состояния* — это макроскопические физические величины, характеризующие равновесное состояние системы. Они относятся к системе в целом, не зависят от ее истории и изменяются только в результате взаимодействия с окружающей средой. Для однородной газообразной закрытой системы основными параметрами состояния являются абсолютное давление, абсолютная температура и объем (удельный объем).

*Абсолютное давление*  $p$  (Па) — интенсивная величина, определяемая отношением силы, направленной по нормали к поверхности, к площади этой поверхности. Она характеризует среднюю во времени силу, с которой частицы системы действуют на единицу площади стекла сосуда, в котором заключена система. Давление газа определяется соотношением

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{w}^2}{2}, \quad (1.1)$$

где  $n$  — число молекул в единице объема;  $m$  — масса молекулы;  $\bar{w}^2$  — среднеквадратичная скорость поступательного движения молекул.

В общем случае абсолютное давление  $p$  определяется по показаниям двух приборов — барометра и манометра

(или вакуумметра), т. е. как сумма (разность) барометрического  $p_{\text{бар}}$  и избыточного давления  $p_{\text{изб}}$  (или разрежения  $p_{\text{вак}}$ ) в системе:

$$p = p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}$$

или

$$p = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак.}}$$

В прикладных расчетах, наряду с единицами Паскаль (Па, кПа, МПа), используются и другие единицы измерения давления. Соотношение между ними приведено в таблице 1.1.

*Абсолютная температура*  $T$  (К) — интенсивная физическая величина, характеризующая приходящуюся на одну степень свободы среднюю кинетическую энергию частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия. В прикладном плане температура — количественная мера степени нагревости тела.

Таблица 1.1

Соотношения между единицами измерения давления

Единица	Наименование единицы					
	Па	бар	кгс/см <sup>2</sup>	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 Па	1	$10^{-5}$	$1,02 \times 10^{-5}$	$9,87 \times 10^{-6}$	$7,5024 \times 10^{-3}$	0,102
1 бар	$10^4$	1	1,02	0,987	$7,5024 \times 10^2$	$1,02 \times 10^4$
1 кгс/см <sup>2</sup>	$9,8067 \times 10^4$	0,98067	1	0,97	$7,35 \times 10^2$	$10^4$
1 атм	$1,013 \times 10^5$	1,013	1,033	1	760	$1,033 \times 10^4$
1 мм рт. ст.	$1,33 \times 10^2$	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	1	13,6
1 мм вод. ст.	9,8067	$9,8067 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	$9,87 \times 10^{-5}$	$7,35 \times 10^{-2}$	1

Значение абсолютной температуры связано с величиной средней кинетической энергии молекул вещества соотношением

$$\frac{m\bar{w}^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad (1.2)$$

где  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Связь между температурами, измеренными по шкалам Кельвина ( $T$ , К), Цельсия ( $t$ , °C) и Фаренгейта ( $t$ , °F), определяется соотношениями

$$T, \text{K} = t, \text{°C} + 273,15; \quad t, \text{°F} = 32 + \frac{9}{5}t, \text{°C}$$

или

$$t, \text{°C} = T, \text{K} - 273,15; \quad t, \text{°C} = \frac{5}{9}(t, \text{°F} - 32).$$

*Объем*  $V$ (м<sup>3</sup>) — экстенсивная величина, имеющая наиболее простую трактовку. С термодинамической точки зрения любая составляющая газа имеет объем, равный физическому объему сосуда, в котором находится газ.

*Удельный объем*  $v$  (м<sup>3</sup>/кг) — интенсивная величина, определяемая как отношение объема рабочего тела к массе заключенного в нем вещества

$$v = \frac{V}{M}, \quad (1.3)$$

где  $M$  — масса, кг.

Величина, обратная удельному объему, называется *плотностью вещества*  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{1}{v}. \quad (1.4)$$

При нормальных физических условиях, соответствующих  $p_0 = 101\,325$  Па и  $T_0 = 273,15$  К, плотность газа определяется соотношением

$$\rho_0 = \frac{\mu}{V_{\mu 0}} = \frac{\mu}{22,4},$$

где  $\mu$  — молярная масса газа, кг/кмоль;  $V_{\mu 0} \approx 22,4$  м<sup>3</sup>/кмоль — объем 1 кмоля газа при нормальных физических условиях.

### 1.3. ТЕРМИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

*Уравнением состояния* называется функциональная зависимость макроскопических параметров однородной равновесной термодинамической системы. В простейших системах, к которым относятся газы, пары воды и жидкости, объем, температура и давление связаны *термическим уравнением*:

$$f(p, V, T) = 0. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.5) каждый параметр состояния системы может быть выражен в виде функции двух других параметров:

$$p = f_1(V, T); \quad V = f_2(p, T); \quad T = f_3(p, V). \quad (1.6)$$

Вид уравнений (1.5) и (1.6) определяется физической моделью газа (идеальной, реальной) и его индивидуальными свойствами.

*Идеальный газ* — теоретическая модель газа, в которой при любых давлениях и температурах молекулы не испытывают взаимного притяжения и отталкивания, а их размеры ничтожно малы по сравнению с размерами межмолекулярного пространства.

Уравнение состояния идеального газа называется *объединенным газовым законом Мариотта — Гей-Люссака* и имеет вид

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (1.7)$$

Частным случаем уравнения (1.7) являются законы *Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля*, представленные соответственно выражениями:

$$pV = \text{const}, \quad \text{при } T = \text{const};$$

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \quad \text{при } p = \text{const};$$

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \quad \text{при } V = \text{const}.$$

Константа в правой части уравнения (1.7) может быть найдена с использованием закона Авогадро. Представим

ее уравнением параметров состояния при нормальных физических условиях. Тогда выражение (1.7) можно записать в виде соотношения

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}. \quad (1.8)$$

Выразим объем газа через его мольный объем:

$$V = \frac{M}{\mu} V_\mu \quad (1.9a)$$

или

$$V_0 = \frac{M}{\mu} V_{\mu 0}. \quad (1.9b)$$

Подставив соотношение (1.9б) в уравнение (1.8), получим выражение

$$\frac{pV}{T} = \frac{M}{\mu} \frac{p_0 V_{\mu 0}}{T_0}. \quad (1.10)$$

С учетом  $R_\mu = \frac{p_0 V_{\mu 0}}{T_0}$  и  $N = \frac{M}{\mu}$  соотношение (1.10) преобразуется в *уравнение состояния Менделеева — Клапейрона* для произвольного числа кмолов идеального газа:

$$pV = N R_\mu T, \quad (1.11)$$

где  $R_\mu \approx 8314$  Дж/(кмоль·К) — *универсальная газовая постоянная*;  $N$  — число кмолов газа.

Для 1 кмоля газа из уравнения (1.11) получаем

$$p v_\mu = R_\mu T, \quad (1.12)$$

где  $v_\mu = \mu v$  — молярный объем газа,  $\text{м}^3/\text{кмоль}$ .

При расчетах с произвольной массой газа уравнение состояния имеет вид

$$pV = MRT, \quad (1.13)$$

где  $R = \frac{R_\mu}{\mu}$  — *индивидуальная газовая постоянная*, Дж/(кг·К).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)