

Коэффициент

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{37,1}{28,8} = 1,29,$$

$$A = -\Delta U = \frac{2,27 \cdot 8,314 \cdot 273}{1,29 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{203}{101} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} \right] = -2970 \text{ Дж} = -2,97 \text{ кДж}.$$

Из уравнения (1, 2) имеем

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) = \Delta U + (P_2V_2 - P_1V_1).$$

Выражая конечный объем  $V_2$  из уравнения адиабаты  $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$ , получим

$$\Delta H = \Delta U + P_1V_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = 2,97 + 1,013 \cdot 10^5 \times 0,0509 \left[ \left( \frac{203}{101} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} - 1 \right] 10^{-3} = 3,83 \text{ кДж}.$$

### Задачи \*

1. Какое количество тепла потребуется для нагревания  $1 \text{ м}^3$  воздуха от  $0$  до  $1^\circ \text{С}$  при постоянном объеме и начальном давлении  $P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ? Плотность воздуха при нормальных условиях  $1,29 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость при постоянном давлении  $C_p = 1,01 \text{ Дж/г} \cdot \text{град}$ .

2. Определить количество теплоты, необходимое для нагревания  $5 \text{ г}$  азота от  $15$  до  $25^\circ \text{С}$  при постоянном объеме.

3. Газ, расширяясь от  $0,01$  до  $0,016 \text{ м}^3$ , при постоянном давлении  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  поглощает  $126 \text{ Дж}$  тепла. Определить изменение внутренней энергии.

4. Смешано  $4,03 \text{ г}$  водорода и  $32 \text{ г}$  кислорода. Их удельные теплоемкости  $C_p$  соответственно равны  $14,3$  и  $0,912 \text{ Дж/г} \cdot \text{град}$ . Определить потерю тепла при охлаждении этой смеси на  $20^\circ$  при постоянном объеме.

5. Определить количество теплоты, которое необходимо для нагревания при  $V = \text{const}$   $25 \text{ г}$  кислорода, находящегося при  $350^\circ \text{С}$ , от  $1,013 \cdot 10^5$  до  $5,065 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

6. При нормальных условиях  $0,005 \text{ м}^3$  криптона нагревают до  $600^\circ \text{С}$  при постоянном объеме. Каково конечное

давление газа и количество тепла, затраченное на нагревание?

7. В резервуаре емкостью  $0,05 \text{ м}^3$  при  $10^\circ \text{С}$  и избыточном давлении  $5,065 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  содержится азот. Определить максимальное количество теплоты, которое можно сообщить газу, если стенки резервуара выдерживают давление, не превышающее  $20,26 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

8. Вычислить работу, совершаемую при расширении газовой системы на  $0,005 \text{ м}^3$  и давлении  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

9. Какое количество работы будет совершено  $1 \text{ кг}$   $\text{CO}_2$  при повышении его температуры на  $200^\circ$  при постоянном давлении?

10. При постоянном давлении  $9,59 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$  нагревают  $5 \text{ м}^3$  азота. Определить совершенную работу, если газ расширился до  $8 \text{ м}^3$ .

11. Какое количество теплоты потребуется, чтобы нагреть  $10 \text{ г}$  паров ртути на  $10^\circ$  при постоянном давлении? (Пары ртути одноатомны.)

12. В цилиндрическом сосуде, закрытом невесомым подвижным поршнем,  $1 \text{ м}^3$  водорода находится при  $0^\circ \text{С}$ . Внешнее давление  $9,72 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ . Какое количество теплоты потребуется на нагревание водорода до  $300^\circ \text{С}$ ?

13. Под давлением  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и при  $15^\circ \text{С}$   $0,025 \text{ м}^3$  воздуха расширяется до  $0,1 \text{ м}^3$ . Определить работу и конечное давление газа.

14. Найти изменение внутренней энергии при испарении  $0,2 \text{ кг}$  этанола при температуре его кипения под давлением  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Теплота парообразования спирта при температуре кипения равна  $857,7 \text{ Дж/г}$ , а удельный объем пара равен  $0,607 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Объемом жидкости пренебречь.

15. Найти изменение внутренней энергии гелия, изобарно расширяющегося от  $0,005$  до  $0,01 \text{ м}^3$  под давлением  $1,96 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

16. Вычислить работу расширения при нагревании  $2 \text{ г}$  воздуха от  $0$  до  $1^\circ \text{С}$  при давлении  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Плотность воздуха при нормальных условиях  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

17. Определить количество теплоты и работу при нагревании азота от  $0,5$  до  $4 \text{ м}^3$  при  $26,8^\circ \text{С}$  и  $9,32 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ .

18. При  $25^\circ \text{С}$  и  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  в сосуде находится  $1 \text{ кг}$  азота. Вычислить  $Q$ ,  $\Delta U$  и  $A$  при изохорном увеличении давления до  $2,026 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  и при изобарном расширении до трехкратного объема.

\* При решении задач предполагается, что газы подчиняются законам идеальных газов.

19. Вычислить работу расширения, если 100 г воды при 50° С расширяются от 0,04 до 0,2 м<sup>3</sup>.

20. При 100° С 6 г кислорода занимают объем 0,004 м<sup>3</sup>. Вычислить работу при изотермном расширении до объема 0,0045 м<sup>3</sup>.

21. Определить работу, необходимую для изотермного сжатия 1 кг-моль двуокиси углерода при 20° С и давлении от 1,02 · 10<sup>5</sup> до 35,70 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>.

22. Какое количество тепла выделится при изотермном сжатии 0,015 м<sup>3</sup> идеального газа при 36,8° С и 1,013 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>, если объем его уменьшится в 5 раз?

23. При 0° С и 5,065 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup> 0,002 м<sup>3</sup> азота расширяются изотермно до давления 1,013 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>. Вычислить работу и количество поглощенной теплоты.

24. Определить изменение внутренней энергии при испарении 20 г этанола при температуре кипения, если удельная теплота испарения его равна 857,7 дж/г, а удельный объем пара при температуре кипения — 607 см<sup>3</sup>/г. Объемом жидкости пренебречь.

25. Определить работу адиабатного сжатия 1 моль двухатомного идеального газа при повышении температуры от 15 до 25° С.

26. При 27° С и 10,13 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup> 8 г кислорода расширяются адиабатно до давления 1,013 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>. Вычислить конечную температуру и работу, совершенную кислородом.

27. Определить температуру и работу при адиабатном сжатии 0,01 м<sup>3</sup> азота до 1/10 его первоначального объема, если начальные температура 26,8° С и давление 1,013 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>.

28. Вычислить работу адиабатного расширения 1 моль одноатомного идеального газа при понижении температуры от 100 до 25° С. Начальное давление 10,13 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>, конечное 2,026 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup>.

29. В цилиндре при 18° С и 1,013 · 10<sup>5</sup> н/м<sup>2</sup> находится гремучая смесь. При изменении объема от 3,77 · 10<sup>-4</sup> до 0,302 · 10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup> произошел взрыв. Определить температуру и давление в момент взрыва, если сжатие происходит без обмена теплоты с окружающей средой.

30. При 17° С 10 г кислорода сжимаются адиабатно от 0,008 до 0,005 м<sup>3</sup>. Определить конечную температуру, затраченную работу, изменение внутренней энергии и изменение энтальпии.

## § 2. РАСЧЕТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА СООТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ТЕПЛОЕМКОСТЬЮ И ТЕПЛОТОЙ ПРОЦЕССА, ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ ИЛИ ЭНТАЛЬПИЕЙ СИСТЕМЫ

Истинная теплоемкость при постоянном объеме и при постоянном давлении определяется соотношениями:

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V, \quad (1,8)$$

$$C_P = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_P = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P.$$

Средняя теплоемкость  $\bar{C}$  в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$  определяется соотношением

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_2 - T_1}, \quad (1,9)$$

где  $Q$  — количество теплоты, вызвавшее изменение температуры от  $T_1$  до  $T_2$ .

Различают мольную (атомную) и удельную теплоемкость.

Размерности теплоемкостей: ,  
мольной  $C = \text{дж/моль} \cdot \text{град}$ ;  
удельной  $c = \text{дж/г} \cdot \text{град}$ .

Зависимость теплоемкости от температуры для практических расчетов выражают обычно эмпирическими (интерполяционными) формулами в виде степенных рядов от температуры:

$$C = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (1,10)$$

или

$$C = a + bT + c'T^{-2}, \quad (1,11)$$

где  $a, b, c, c', d$  — эмпирические коэффициенты\*, справедливые для данного интервала температур.

Для определения средней теплоемкости по истинной пользуются соотношениями:

\* Для обоих рядов коэффициенты  $a, b$  имеют различные значения.

$$\bar{c} = \frac{1}{t - t_1} \int_{t_1}^t C dt; \quad \bar{C} = \frac{1}{T - T_1} \int_{T_1}^T C dT \quad (I,12)$$

для вычисления истинной теплоемкости по средней — соотношениями:

$$C = \frac{d[\bar{C}(t - t_1)]}{dt}; \quad C = \frac{d[\bar{C}(T - T_1)]}{dT} \quad (I,13)$$

Количество теплоты, затраченное на нагревание  $n$  моль вещества от  $T_1$  до  $T_2$ , определяется из соотношений:

$$Q_V = \Delta U = n \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = n \bar{C}_V (T_2 - T_1), \quad (I,14)$$

$$Q_P = \Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} C_P dT = n \bar{C}_P (T_2 - T_1). \quad (I,15)$$

Учитывая, что теплоемкость является функцией температуры, для расчета количества теплоты используют уравнение

$$Q_P = n \left[ a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} b(T_2^2 - T_1^2) + C' \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right]. \quad (I,16)$$

**Пример 1.** Вычислить среднюю молярную теплоемкость  $\text{NH}_3$  в интервале температур от 200 до 300° К, если выражение для зависимости его истинной теплоемкости от температуры в этом температурном интервале имеет вид

$$C_P = 24,8 + 37,5 \cdot 10^{-3} T - 7,36 \cdot 10^{-6} T^2 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.}$$

**Решение.** Среднюю молярную теплоемкость рассчитывают по уравнению (I,12) с учетом (I,10):

$$\bar{C} = a + \frac{1}{2} (T_2 + T_1) b + \frac{1}{3} (T_2^2 + T_1 T_2 + T_1^2) c.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \bar{C} &= 24,8 + \frac{1}{2} (300 + 200) \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{3} (300^2 + 200 \cdot 300 + \\ &+ 200^2) \cdot 7,36 \cdot 10^{-6} = 33,7 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.} \end{aligned}$$

**Пример 2.** Средняя удельная теплоемкость  $\text{TiO}_2$  (рутил) в интервале от 0 до  $t^\circ \text{C}$  выражается уравнением

$$C_P^{\text{TiO}_2} = 0,782 + 1,41 \cdot 10^{-4} t - 0,557 \cdot 10^{-8} t^2 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.}$$

Рассчитать истинную удельную теплоемкость рутила при 500° С. Решение Среднюю удельную теплоемкость вычисляем по уравнению (I,13) с учетом (I,11):

$$C_P = a + 2bt - c't^{-2}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} C_P^{\text{TiO}_2} &= 0,782 + 2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot 500 + 0,557 \cdot 10^8 \cdot 500^{-2} = \\ &= 0,883 \text{ Дж/г} \cdot \text{град.} \end{aligned}$$

**Пример 3.** Определить количество теплоты, поглощенное при нагревании 1 кг  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд) от 298 до 1000° К, если его молярная теплоемкость в интервале температур 298—1800° К может быть выражена уравнением

$$C_P = 115 + 12,8 \cdot 10^{-3} T - 35,4 \cdot 10^5 T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.}$$

**Решение** Из уравнения (I,16) находим

$$\begin{aligned} Q_P &= \frac{1000}{102} \left[ 115(1000 - 298) + \frac{1}{2} 12,8 \cdot 10^{-3} (1000^2 - 298^2) - \right. \\ &\left. - 35,4 \cdot 10^5 \frac{1000 - 298}{298 \cdot 1000} \right] = 766 \text{ 000 Дж} = 766 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

## Задачи

1. Зависимость молярной энтальпии двуокиси олова от температуры в интервале 298÷1500° К выражается уравнением

$$\begin{aligned} H_T - H_{298} &= 73,889T + 5,021 \cdot 10^{-3} T^2 + \\ &+ \frac{21,589 \cdot 10^5}{T} \text{ Дж/моль.} \end{aligned}$$

Получить выражение зависимости истинной молярной теплоемкости при  $P = \text{const}$  от температуры. Вычислить  $C_P$  при 500° С и результат сопоставить со значением  $C_P = 71,077 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.}$

2. Зависимость истинной молярной теплоемкости от температуры для сульфида серебра в интервале 298÷452° К можно выразить уравнением

$$C_P = 42,38 + 110,46 \cdot 10^{-3} T \text{ Дж/моль} \cdot \text{град.}$$

Рассчитать среднюю теплоемкость в указанном интервале температур.

3. Средняя молярная теплоемкость твердого едкого натра в интервале температур  $298 \div 595^\circ \text{K}$  составляет  $80,32 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$  и жидкого едкого натра в интервале  $595 \text{—} 900^\circ \text{K}$  —  $85,35 \text{ Дж/град} \cdot \text{моль}$ . Определить количество теплоты, поглощенное при изобарном нагревании  $1 \text{ кг}$  едкого натра от  $298$  до  $700^\circ \text{K}$ , если теплота плавления равна  $8363 \text{ Дж/моль}$  и температура плавления  $595^\circ \text{K}$ .

4. Зависимость молярной теплоемкости фосфата кальция  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  от температуры выражается уравнением  $C_p = 203,3 + 170,1 \cdot 10^{-3}T - 26,11 \cdot 10^5 T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$  в интервале температур  $273 \div 1373^\circ \text{K}$ . Найти изменение энтальпии при нагревании этого вещества от  $600$  до  $900^\circ \text{K}$ .

5. Рассчитать молярную теплоемкость  $C_p$  хлорида никеля при  $25^\circ \text{C}$ , пользуясь правилом Дюлонга и Пти в сочетании с правилом аддитивности. Опытная молярная теплоемкость хлорида никеля от температуры приблизительно выражается уравнением

$$C_p = 54,81 + 54,81 \cdot 10^{-3}T \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Вычислить расхождение между расчетной и опытной теплоемкостями хлорида никеля.

6. Зависимость молярной теплоемкости газообразной двухатомной серы от температуры можно выразить уравнением

$$C_p = 36,108 + 1,506 \cdot 10^{-3}T - 3,515 \cdot 10^5 T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$$

в интервале температур  $273 \div 2000^\circ \text{K}$ .

Получить выражение для зависимости энтальпии от температуры для  $1 \text{ моль}$  этого газа в этом интервале температур (принять  $T_1 = 273^\circ \text{K}$ ). Рассчитать изменение энтальпии при нагревании  $1 \text{ моль}$  газообразной серы от  $273$  до  $1000^\circ \text{K}$ .

7. Вычислить изменение энтальпии азота при охлаждении  $1 \text{ м}^3$  дымовых газов от  $230$  до  $15^\circ \text{C}$ . Содержание азота в дымовых газах  $80 \text{ об. \%}$ . Зависимость истинной молярной теплоемкости азота от температуры имеет вид

$$C_p = 27,2 + 0,00418T \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

8. Истинная атомная теплоемкость меди выражается уравнением

$$C_p = 22,64 + 6,28 \cdot 10^{-3}T \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Удельная теплота плавления меди равна  $179,9 \text{ Дж/г}$ . Какое количество тепла выделится при затвердевании  $1 \text{ кг}$  расплавленной меди и охлаждении ее от температуры плавления  $1065$  до  $15^\circ \text{C}$ .

9. Истинная удельная теплоемкость твердой меди может быть рассчитана по уравнению

$$c_p = 0,3563 + 9,88 \cdot 10^{-5}T \text{ Дж/моль} \cdot \text{град};$$

медь плавится при  $1065^\circ$ , теплота плавления равна  $179,9 \text{ Дж/г}$ . К  $1 \text{ кг}$  меди, взятому при  $15^\circ \text{C}$ , подведено  $541,2 \text{ кДж}$ . Какое количество меди расплавилось?

10. Истинная удельная теплоемкость свинца может быть рассчитана по уравнению

$$c = 0,1233 + 5,682 \cdot 10^{-5}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град}.$$

Температура плавления свинца  $326^\circ \text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы расплавить  $1 \text{ кг}$  металла, взятого при  $17^\circ \text{C}$ ?

11. Истинная молярная теплоемкость водяного пара может быть выражена уравнением

$$C_p = 28,83 + 13,74 \cdot 10^{-3}T - 1,435 \cdot 10^{-6}T^2 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Какое количество теплоты выделится при охлаждении  $90 \text{ г}$  пара от  $307$  до  $100^\circ \text{C}$  при постоянном давлении  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

12. Проверить правило Дюлонга и Пти для меди, цинка и кадмия при  $17^\circ \text{C}$ . Даны истинные удельные теплоемкости при постоянном давлении:

$$\text{для Cu } c = 0,3849 + 8,891 \cdot 10^{-5}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град},$$

$$\text{для Zn } c = 0,3795 + 18,58 \cdot 10^{-6}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град},$$

$$\text{для Cd } c = 0,2285 + 9,904 \cdot 10^{-5}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град}.$$

13. Истинная удельная теплоемкость жидкого цинка выражается уравнением

$$c_{(\text{ж})} = 0,362 + 26,78 \cdot 10^{-5}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град},$$

а твердого цинка

$$c_{(\text{т})} = 0,3795 + 18,58 \cdot 10^{-6}t \text{ Дж/г} \cdot \text{град}.$$

Какое количество теплоты выделится при охлаждении  $300 \text{ г}$  этого металла от  $500$  до  $0^\circ \text{C}$ , если температура плавления цинка  $419^\circ \text{C}$  и удельная теплота плавления  $117,2 \text{ Дж/г}$ .

Рассчитать теплоемкости 1 г-атом твердого и расплавленного цинка при температуре плавления.

14. Вычислить отношение работы расширения к количеству теплоты, затраченной при нагревании 1 кг меди от 0 до 250° С. Коэффициент объемного расширения меди равен  $5,01 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ , плотность меди  $8,93 \text{ г/см}^3$ ; удельная теплоемкость в указанном интервале температур  $0,392 \text{ дж/г} \cdot \text{град}$ .

15. Вычислить отношение работы расширения к поглощенной теплоте при нагревании  $0,02 \text{ м}^3$  воздуха от 27 до 227° С и постоянном давлении  $1,013 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Для кислорода и азота истинная молярная теплоемкость рассчитывается по уравнению

$$C_p = 27,2 + 0,00418T \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

16. Средняя удельная теплоемкость для  $\text{CO}_2$  в интервале температур от 0 до 200° С выражается уравнением

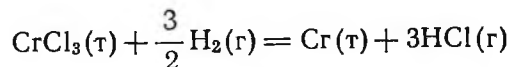
$$c_p = 0,8485 + 28,95 \cdot 10^{-5}t - 6,82 \cdot 10^{-8}t^2 \text{ дж/г} \cdot \text{град}.$$

Найти зависимость истинной молярной теплоемкости от абсолютной температуры и количества теплоты, которое пойдет на нагревание 220 г  $\text{CO}_2$  от 0 до 100° С при постоянном давлении. Какая часть этого тепла идет на повышение внутренней энергии газа?

17. Комната имеет площадь  $20 \text{ м}^2$  и высоту 4 м. Какое количество теплоты потребуется, чтобы нагреть воздух в этой комнате от 10 до 20° С при полной термоизоляции, если для азота и кислорода истинная молярная теплоемкость

$$C_p = 27,19 + 4,18 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

18. Металлический хром может быть получен восстановлением хлорида хрома водородом по уравнению реакции



Эффективность использования водорода 50%. Истинные молярные теплоемкости

$$C_p^{\text{H}_2} = 27,19 + 3,766 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/моль} \cdot \text{град}$$

$$\text{и } C_p^{\text{CrCl}_3} = 8,340 + 29,41 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Определить минимальное количество теплоты, необходимое для нагревания от 25 до 900° С исходных веществ для получения 1 кг хрома.

19. Средняя молярная теплоемкость двуокиси углерода (в пределах температур 273÷1200° К) выражается уравнением

$$C_p = 43,26 + 5,732 \cdot 10^{-3}T + 8,18 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Определить истинную молярную теплоемкость  $\text{CO}_2$  при постоянном давлении и 0° С.

20. Истинная атомная теплоемкость ромбической серы выражается уравнением

$$C_p = 14,98 + 26,11 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/г-атом} \cdot \text{град}.$$

Определить значение средней атомной теплоемкости серы в пределах от 0 до 95,6° С.

21. Зависимость истинной атомной теплоемкости металлического ниобия от температуры выражается уравнением

$$C_p = 23,81 + 3,816 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/г-атом} \cdot \text{град},$$

которое справедливо в интервале 273÷1573° К. Получить зависимость энтальпии ниобия от температуры в виде уравнения. Вычислить изменение энтальпии  $H_{1273} - H_{273}$  для 1 г-атом ниобия.

22. Какое количество теплоты поглощается при нагревании 2 кг меди от 25 до 1000° С, если молярная теплоемкость меди выражается уравнением

$$C_p = 22,64 + 6,28 \cdot 10^{-3}T \text{ дж/г-атом} \cdot \text{град}.$$

23. Количество теплоты, выделяющееся при остывании 1 г платины от  $T$  до  $T_0$ , рассчитывается по уравнению

$$Q = 0,1322(T - T_0) + 12,23(T^2 - T_0^2) 10^{-6} \text{ дж/г}.$$

Вывести уравнение зависимости средней и истинной атомной теплоемкости платины от температуры в интервале  $T_0 - T$ . Рассчитать истинную атомную теплоемкость платины при 30° С.

24. Истинная удельная теплоемкость ртути выражается уравнением

$$c = 0,1479 - 2,89 \cdot 10^{-5}t \text{ дж/г} \cdot \text{град}.$$

Определить количество теплоты, необходимое для нагревания 50 г ртути от 0 до 357° С.

25. Истинные удельные теплоемкости ряда металлов могут быть выражены уравнениями:

$$\text{для Cu } c = 0,385 + 8,891 \cdot 10^{-5}t \text{ дж/г} \cdot \text{град},$$

$$\text{для Pb } c = 0,124 + 5,682 \cdot 10^{-5}t \text{ дж/г} \cdot \text{град},$$

$$\text{для Zn } c = 0,379 + 1,858 \cdot 10^{-4}t \text{ дж/г} \cdot \text{град},$$

$$\text{для Cd } c = 0,228 + 1,858 \cdot 10^{-4}t \text{ дж/г} \cdot \text{град}.$$

Рассчитать величины средних теплоемкостей в интервале 0—100° С.

26. Количество теплоты, расходуемое на нагревание 1 кг окиси железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) от 0 до  $t^\circ$  С, выражается уравнением

$$Q = 770,7t + 0,226t^2 \text{ дж/кг}.$$

Получить уравнение зависимости истинной мольной теплоемкости окиси железа от температуры.

27. Истинная мольная теплоемкость окиси кальция выражается уравнением

$$C_P^{\text{CaO}} = 48,83 + 4,519 \cdot 10^{-3}T - 6,527 \cdot 10^5 T^{-2} \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Определить количество теплоты, необходимое для нагревания 10 кг CaO от 0 до 900° С.

28. Средняя удельная теплоемкость CO<sub>2</sub> при постоянном давлении в интервале температур от 0 до 1000° С выражается уравнением

$$\bar{c}_P = 1,003 + 10,27 \cdot 10^{-5}T + 19,41 \cdot 10^3 T^{-2} \text{ дж/г} \cdot \text{град}.$$

Найти истинную мольную теплоемкость CO<sub>2</sub> при 500° С.

29. Мольная теплоемкость кварца SiO<sub>2</sub> выражается уравнением

$$C_P = 46,95 + 34,36 \cdot 10^{-3}T + 11,3 \cdot 10^5 T^{-2} \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Получить уравнение для вычисления теплоты, расходуемой на нагревание 1 кг кварца от  $T_1$  до  $T_2$ .

30. В калориметре смешаны 50 г льда, взятого при 0° С, и 150 г воды, взятой при 50° С. Определить конечную температуру, если удельная теплота плавления льда 334,7 дж/г и удельная теплоемкость воды 4,184 дж/г·град.

### § 3. РАСЧЕТ МОЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ ПО УРАВНЕНИЮ ЭЙНШТЕЙНА

Мольная теплоемкость идеальных газов вычисляется по формуле Эйнштейна

$$C_P = \frac{5+m}{2}R + \sum_{m'} C_E \left( \frac{\theta}{T} \right), \quad (1,17)$$

где  $m$  — число вращательных степеней свободы (вращение всей молекулы);  $m'$  — сумма чисел степеней свободы колебательного движения атомов в молекуле;  $\theta$  — характеристическая температура, зависящая от частоты данного колебания в молекуле;  $C_E \left( \frac{\theta}{T} \right)$  — функция Эйнштейна.

Для газов с линейной структурой (двухатомные газы, CO<sub>2</sub>, COS, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub> и др.)  $m=2$ , для прочих многоатомных газов  $m=3$ . Число степеней свободы  $m'$  подсчитывается по уравнению

$$m' = 3n - (3 + m). \quad (1,18)$$

Значения  $\theta$  для различных газов и функции  $C_E \left( \frac{\theta}{T} \right)$

приводятся в физико-химических справочниках.

**Пример.** Вычислить истинную мольную теплоемкость CH<sub>4</sub> при  $P = \text{const}$  и 1300° К, пользуясь таблицей функций Эйнштейна. Сравнить полученные значения с величиной, вычисленной по эмпирической формуле

$$C_P^{\text{CH}_4} = 14,3 + 74,9 \cdot 10^{-3}T - 17,5 \cdot 10^{-6}T^2 \text{ дж/моль} \cdot \text{град}.$$

**Решение.** Значения характеристических температур для метана:  $\theta_1=1870$  (3);  $\theta_2=2170$  (2);  $\theta_3=4320$  (3);  $\theta_4=4400$  (цифры в скобках показывают число вырожденных колебаний в молекуле, т. е. имеющих одинаковые значения  $\theta$ ).

Принимая  $m=3$ , рассчитываем теплоемкость при постоянном давлении по формуле (1,17).

$$\begin{aligned} C_P &= \frac{5+3}{2} 8,314 + 3C_E \left( \frac{1870}{1300} \right) + 2C_E \left( \frac{2170}{1300} \right) + 3C_E \left( \frac{4320}{1300} \right) + \\ &+ C_E \left( \frac{4400}{1300} \right) = 33,3 + 3C_E(1,44) + 2C_E(1,67) + \\ &+ 3C_E(2,23) + C_E(3,38). \end{aligned}$$