

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»
Институт механизации и технического сервиса**

Кафедра «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов»

СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Методические указания

для выполнения самостоятельной работы по дисциплине

«Теплотехника»

Казань, 2022

УДК 536 (07)
ББК 22. 317

Составитель: Халиуллин Ф.Х. – к.т.н., доцент кафедры «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов».

Рецензенты:

Гаврилов А.М. - к.т.н., старший преподаватель кафедры «Автомобильные двигатели и сервис» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,

Матяшин А.В. - к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО Казанский ГАУ.

Практикум утвержден и рекомендован к печати на заседании кафедры «Тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ» «10» января 2022 года (протокол № 8).

Практикум обсужден, одобрен и рекомендован к печати на заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ» «24» февраля 2022 года (протокол № 7).

Халиуллин, Ф.Х. Смеси идеальных газов. Теплоемкость. Методические указания для выполнения самост. работ /Ф.Х. Халиуллин – Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2022. – 17 с.

Методические указания предназначены для выполнения самостоятельных работ по дисциплинам «Теплотехника» и «Термодинамика» и адресован студентам, обучающимся по направлениям подготовки: 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06 «Агроинженерия», 20.03.01- «Техносферная безопасность» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

УДК 536 (07)
ББК 22. 317

© Казанский государственный аграрный университет, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 ПОРЯДОК ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К ЗАДАНИЮ..... | 4 |
| 2 СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ..... | 4 |
| 3 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ | |
| 3.1 Способы задания газовой смеси..... | 8 |
| 3.2 Газовая постоянная смеси..... | 9 |
| 3.3 Кажущая (средняя) молярная масса смеси..... | 10 |
| 3.4 Соотношения между массовыми и объемными долями..... | 10 |
| 3.5 Парциальные давления компонентов смеси..... | 11 |
| 3.6 Определение удельных объемов и плотностей..... | 11 |
| 4 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ | |
| 4.1 Основные понятия и определения..... | 12 |
| 4.2 Изохорная и изобарная теплоемкости..... | 14 |
| 4.3 Теплоемкость смеси газов..... | 14 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ..... | 16 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 17 |

ВВЕДЕНИЕ

В данных методических указаниях приведены исходные данные самостоятельной работе по дисциплине «Теплотехника» на тему «Смеси идеальных газов. Теплоемкость» и основные положения, необходимые для его выполнения.

Задание должно быть оформлено с соблюдением требований, предъявляемых к расчетно-пояснительным запискам.

1. ПОРЯДОК ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К ЗАДАНИЮ

1.1. Номер задания по таблице 2.1 «Состав газовой смеси» определяется по последним двум цифрам номера зачетной книжки (n). Если $n > 50$, то номер задания определяется как разность $n - 50$ (00 принимается за 100; если $n = 1 \dots 9$, то номер задания соответствует n)

1.2. Группы с нечетными номерами выполняют 1 вариант (состав смеси задан в массовых долях), а группы с четными номерами – 2 вариант (состав смеси задан в объемных долях).

1.3. Номер исходных данных «Параметры газовой смеси» (табл.2.2) должен соответствовать порядковому номеру фамилии студента в журнале преподавателя.

2. СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ

2.1. Газовая смесь задана в массовых g_i (вариант 1) или в объемных долях z_i (вариант 2) (таблица 2.1) давление смеси $p_{см}$, объем смеси $v_{см}$, температура $t_{см}$, интервал температур ($t_1 \dots t_2$) (таблица 2.2).

2.2 Необходимо определить

2.2.1. Объемные доли компонентов (если смесь задана в массовых долях) или массовые доли (если смесь задана в объемных долях).

2.2.2. Газовые постоянные компонентов R_i и смеси $R_{см}$.

2.2.3. Среднюю (кажущуюся) молярную массу смеси $\mu_{см}$ через объемные и массовые доли.

2.2.4. Парциальные давления компонентов p_i через объемные и массовые доли.

2.2.5. Массы компонентов и смеси ($m_i, m_{см}$).

2.2.6. Парциальные объемы компонентов V_i .

2.2.7. Плотности компонентов ρ_i и смеси $\rho_{см}$ при заданных условиях

2.2.8. Плотность компонентов и смеси при нормальных физических условиях.

2.2.9. Средние теплоемкости смеси (молярные $\mu c_p \int_{t_1}^{t_2}$, $\mu c_v \int_{t_1}^{t_2}$, массовые $c_p \int_{t_1}^{t_2}$, $c_v \int_{t_1}^{t_2}$, и объемные $c'_p \int_{t_1}^{t_2}$, $c'_v \int_{t_1}^{t_2}$, для заданного интервала температур ($t_1 \dots t_2$).

2.2.10. Количество теплоты, необходимое на нагревание (охлаждение) смеси в заданных интервалах температур.

Таблица 2.1 - Состав газовой смеси

| № | Состав газовой смеси, % | | | | | | |
|-----|-------------------------|----------------|----|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| п/п | CO ₂ | H ₂ | CO | N ₂ | H ₂ O | SO ₄ | O ₂ |
| 1 | 12 | - | - | 75 | 13 | - | - |
| 2 | 18 | - | 2 | 80 | - | - | - |
| 3 | - | - | 15 | 70 | - | 15 | - |
| 4 | - | - | - | 75 | 12 | - | 13 |
| 5 | - | 10 | 30 | 60 | - | - | - |
| 6 | - | - | - | 50 | 20 | 30 | - |
| 7 | 24 | - | - | 60 | - | - | 16 |
| 8 | - | - | 20 | 70 | 10 | - | - |
| 9 | - | - | - | 75 | - | 10 | 15 |
| 10 | 15 | - | - | 76 | - | - | 9 |
| 11 | 20 | - | - | - | 20 | - | 60 |
| 12 | 16 | - | - | 76 | - | - | 8 |
| 13 | - | - | 7 | 85 | - | - | 8 |
| 14 | 15 | - | - | 75 | 10 | - | - |
| 15 | - | 20 | - | 70 | - | - | 10 |
| 16 | 18 | - | - | 80 | - | 2 | - |
| 17 | - | 15 | - | 55 | - | - | 30 |
| 18 | 14 | - | - | 76 | 10 | - | - |
| 19 | 5 | - | 25 | 70 | - | - | - |
| 20 | - | 15 | - | 60 | - | - | 25 |
| 21 | 10 | - | - | 75 | - | - | 15 |
| 22 | - | - | 15 | 80 | - | - | 5 |
| 23 | 17 | - | - | 74 | 9 | - | - |
| 24 | - | - | 20 | 70 | - | - | 10 |
| 25 | - | - | 28 | 55 | 17 | - | - |
| 26 | 15 | - | - | 47 | - | - | 38 |
| 27 | - | 17 | 40 | 43 | - | - | - |
| 28 | 22 | - | - | 65 | - | 13 | - |

Продолжение таблицы 2.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 29 | - | - | 23 | 62 | - | 15 | - |
| 30 | 10 | - | - | 80 | - | - | 10 |
| 31 | - | - | 20 | 50 | - | - | 30 |
| 32 | 30 | - | - | - | 25 | - | 45 |
| 33 | - | - | 30 | 60 | - | 10 | - |
| 34 | - | - | 20 | 40 | - | - | 40 |
| 35 | 10 | - | - | 70 | - | - | 20 |
| 36 | 15 | - | - | - | 15 | - | 70 |
| 37 | - | - | - | 80 | 10 | 10 | - |
| 38 | - | 20 | - | - | 15 | - | 65 |
| 39 | 30 | - | - | 40 | - | 30 | - |
| 40 | - | - | - | 60 | - | 10 | 30 |
| 41 | 17 | - | 27 | 56 | - | - | - |
| 42 | 23 | - | - | 57 | - | - | 20 |
| 43 | - | - | 20 | 65 | 15 | - | - |
| 44 | - | 18 | - | 57 | - | 25 | - |
| 45 | - | 20 | - | 70 | - | - | 10 |
| 46 | - | 5 | 10 | 85 | - | - | - |
| 47 | 27 | - | - | 58 | 15 | - | - |
| 48 | 35 | - | - | - | - | 30 | 35 |
| 49 | - | 30 | - | 60 | 10 | - | - |
| 50 | 53 | - | 32 | - | 15 | - | - |

Таблица 2.2 - Параметры газовой смеси

| № п/п | $\rho_{см}$ мм рт.ст. | $V_{см}, м^3$ | $t_{см}, °C$ | Интервал температур ($t_1...t_2$) |
|----------|--------------------------|---------------|--------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1500 | 2 | 100 | 200...500 |
| 2 | 1450 | 3 | 110 | 300...100 |
| 3 | 1400 | 4 | 120 | 100...300 |
| 4 | 1350 | 5 | 130 | 600...200 |
| 5 | 1300 | 6 | 140 | 1000..100 |
| 6 | 1250 | 7 | 150 | 900...200 |
| 7 | 1200 | 8 | 160 | 700...500 |
| 8 | 1150 | 9 | 170 | 500...200 |
| 9 | 1100 | 10 | 180 | 800...300 |
| 10 | 1000 | 2 | 190 | 600...100 |
| 11 | 950 | 3 | 200 | 750...250 |

Продолжение таблицы 2.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 12 | 900 | 4 | 250 | 1000..500 |
| 13 | 850 | 5 | 300 | 300..1200 |
| 14 | 800 | 6 | 350 | 600...900 |
| 15 | 750 | 7 | 400 | 1000..400 |
| 16 | 740 | 8 | 450 | 850...350 |
| 17 | 750 | 9 | 500 | 350...750 |
| 18 | 760 | 10 | 450 | 900...600 |
| 19 | 780 | 9 | 400 | 450...300 |
| 20 | 800 | 8 | 350 | 300...150 |
| 21 | 820 | 7 | 300 | 800...300 |
| 22 | 840 | 8 | 250 | 400...300 |
| 23 | 860 | 9 | 200 | 800...350 |
| 24 | 880 | 10 | 150 | 650...150 |
| 25 | 890 | 2 | 140 | 150..1200 |
| 26 | 1000 | 3 | 130 | 300...800 |
| 27 | 1020 | 4 | 120 | 1100..800 |
| 28 | 1040 | 5 | 110 | 800...400 |
| 29 | 1060 | 6 | 100 | 800...600 |
| 30 | 1080 | 7 | 125 | 600...100 |
| 31 | 1400 | 6 | 150 | 300...100 |
| 32 | 1350 | 7 | 160 | 100...300 |
| 33 | 1300 | 8 | 170 | 600...200 |
| 34 | 1250 | 9 | 180 | 1000..100 |
| 35 | 1200 | 10 | 190 | 900...200 |
| 36 | 1150 | 2 | 200 | 700...500 |
| 37 | 1100 | 3 | 250 | 500...200 |
| 38 | 1000 | 4 | 300 | 800...300 |
| 39 | 950 | 5 | 350 | 600...100 |
| 40 | 900 | 6 | 400 | 750...250 |
| 41 | 850 | 7 | 450 | 1000..500 |
| 42 | 800 | 8 | 500 | 300..1200 |
| 43 | 750 | 9 | 450 | 600...900 |
| 44 | 740 | 10 | 300 | 1000..400 |
| 45 | 750 | 4 | 250 | 850...350 |
| 46 | 760 | 5 | 200 | 350...750 |
| 47 | 780 | 6 | 150 | 650...150 |
| 48 | 1000 | 4 | 300 | 850...350 |
| 49 | 950 | 5 | 350 | 350...750 |
| 50 | 900 | 6 | 400 | 900...600 |

3 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

В инженерной практике часто приходится иметь дело не с однородным газами, а с газовыми смесями, состоящими из газов, химически не связанных между собой. К таким смесям относятся, например, атмосферный воздух, природный газ, продукты сгорания топлива в топочных устройствах паровых и водогрейных котлов, в двигателях внутреннего сгорания и т.п.

В термодинамических расчетах газы, входящие в состав газовой смеси, рассматриваются как идеальные газы. При этом и сама смесь рассматривается как идеальный газ.

В основе изучения газовых смесей лежит закон Дальтона: полное давление смеси идеальных газов равно сумме *парциальных* давлений её компонентов:

$$P = \sum_1^n p_i \quad (3.1)$$

Парциальное давление p_i это давление, которое имел бы газ, если бы он один при той же температуре занимал весь объем смеси.

3.1 Способы задания газовой смеси

Количественное соотношение отдельных компонентов смеси обычно задают массовыми, объемными или мольными долями.

Массовой долей компонента смеси g_i называется величина, равная отношению массы компонента m_i к массе всей смеси $m_{см}$:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см}}. \quad (3.2)$$

Очевидно, что $m_{см} = \sum_1^n m_i$, $\sum_1^n g_i = 1$.

Объемной долей компонента смеси Z_i называется величина, равная отношению приведённого объема компонента V_i к полному объему смеси $V_{см}$:

$$Z_i = \frac{V_i}{V_{см}}. \quad (3.3)$$

Приведенным (парциальным) называется объем, который занимал бы компонент смеси при давлении и температуре смеси.

Для вычисления приведенного объема запишем два уравнения состояния i -го компонента:

$$p_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}}, \quad (3.4)$$

$$p_{\text{см}} V_i = m_i R_i T_{\text{см}}. \quad (3.5)$$

Первое уравнение относится к состоянию компонента в смеси, когда он имеет парциальное давление p_i и занимает полный объем смеси, второе – к приведенному состоянию, когда давление и температура компонента равны давлению и температуру смеси ($p_{\text{см}}$ и $T_{\text{см}}$).

Из этих уравнений следует, что:

$$V_i = V_{\text{см}} - \frac{p_i}{p_{\text{см}}}. \quad (3.6)$$

Просуммировав соотношения (3.6) для всех компонентов смеси (с учетом закона Дальтона) получим:

$$\sum_1^n V_i = V_{\text{см}}, \text{ откуда } \sum_1^n z_i = 1.$$

Мольной долей компонента смеси x_i называется величина, равная отношению числа молей этого компонента n_i и общему числу молей смеси $n_{\text{см}}$:

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{см}}}. \quad (3.7)$$

Очевидно, что $\sum_1^n x_i = 1$.

В соответствии с законом Авогадро, объем моля любого газа при одинаковых p и T одинаковы (в частности, при давлении и температуре смеси). Поэтому приведенный объем любого компонента может быть выполнен как произведение объема моля V_{μ} на число молей этого компонента n_i :

$$V_i = V_{\mu} \cdot n_i, \quad (3.8)$$

а объем смеси:

$$V_{\text{см}} = V_{\mu} \cdot n_{\text{см}}. \quad (3.9)$$

Тогда

$$\frac{V_i}{V_{\text{см}}} = z_i = \frac{n_i}{n_{\text{см}}}. \quad (3.10)$$

3.2 Газовая постоянная смеси

Просуммировав уравнения (3.4) для всех компонентов смеси, получим:

$$V_{\text{см}} \sum_1^n p_i = \sum_1^n g_i m_{\text{см}} R_i T_{\text{см}}.$$

Учитывая (3.1) и (3.2) можно записать

$$p_{\text{см}} V_{\text{см}} = m_{\text{см}} R_{\text{см}} T_{\text{см}}, \quad (3.11)$$

где

$$R_{\text{см}} = \sum_1^n g_i R_i. \quad (3.12)$$

Из уравнения (3.11) следует, что смесь идеальных газов также подчиняется уравнения Клапейрона.

Поскольку $R_i = \frac{8314}{\mu_i}$, то из (3.12) следует, что газовая постоянная смеси будет определяться из выражения:

$$R_{см} = 8314 \sum_1^n (g_i / \mu_i) \quad (3.13)$$

3.3 Кажущая (средняя) молярная масса смеси

Выразим формально газовую постоянную смеси, введя понятие кажущейся молярной массы смеси $\mu_{см}$:

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}. \quad (3.14)$$

Тогда, учитывая (3.13), получим:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n (g_i / \mu_i)}. \quad (3.15)$$

Из определения массовых долей следует, что:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см}} = \frac{\mu_i n_i}{\mu_{см} n_{см}} = \frac{\mu_i \tau_i}{\mu_{см}}. \quad (3.16)$$

Просуммировав эти соотношения для всех компонентов и учитывая, что $\sum_1^n g_i = 1$, получим выражение для кажущейся молярной массы смеси, заданной объемными долями:

$$\mu_{см} = \sum_1^n \tau_i \cdot \mu_i. \quad (3.17)$$

3.4 Соотношения между массовыми и объемными долями

Из (3.16), учитывая (3.17), имеем:

$$g_i = \frac{\mu_i \tau_i}{\sum_1^n \tau_i \mu_i}. \quad (3.18)$$

Поскольку:

$$\tau_i = \frac{V_i}{V_{см}} = \frac{n_i}{n_{см}} = \frac{n_i}{\sum_1^n n_i},$$

то

$$\tau_i = \frac{m_i / \mu_i}{\sum_1^n (m_i / \mu_i)}.$$

Разделив числитель и знаменатель этой формулы на массу смеси, получим:

$$\tau_i = \frac{g_i/\mu_i}{\sum_1^n (g_i/\mu_i)}. \quad (3.19)$$

3.5 Парциальные давления компонентов смеси

Если смесь задана объемными долями, парциальное давление какого-либо компонента смеси можно определить из уравнения (3.6):

$$p_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} p_{\text{см}} = \tau_i p_{\text{см}}. \quad (3.20)$$

Для определения парциального давления в случае задания смеси массовыми долями можно воспользоваться законом Дальтона и уравнениями состояния для i -го газа и для всей смеси:

$$p_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}}, \quad p_{\text{см}} V_{\text{см}} = m_{\text{см}} R_{\text{см}} T_{\text{см}}.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p_i}{p_{\text{см}}} = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} = \frac{R_i}{R_{\text{см}}}.$$

Откуда

$$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} \cdot p_{\text{см}}. \quad (3.21)$$

3.6 Определение удельных объемов и плотностей

Удельные объемы компонентов и смеси для заданных условий можно определить из следующих соотношений ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$v_i = \frac{V_i}{m_i}; \quad v_{\text{см}} = \frac{V_{\text{см}}}{m_{\text{см}}} \quad (3.22)$$

Плотность компонентов и смеси определяются в соответствии с определением понятия плотности вещества ($\text{кг}/\text{м}^3$):

$$\rho = \frac{1}{v}. \quad (3.22)$$

Удельные объемы и плотности газов для нормальных условий определяются из следующих выражений:

$$v_{\text{н}} = \frac{V_{\mu}^{\text{н}}}{\mu} = \frac{22,4}{\mu}; \quad \rho_{\text{н}} = \frac{\mu}{V_{\mu}^{\text{н}}} = \frac{\mu}{22,4}, \quad (3.24)$$

где $V_{\mu}^{\text{н}} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$, $\rho_{\text{н}}$ - объем и плотность газа при нормальных условиях.

4 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

4.1 Основные понятия и определения

Теплоемкостью называется количество теплоты, необходимой для повышения температуры тела на один градус. Теплоемкость не является постоянной величиной, и в общем случае, изменяется с изменением температуры и давления. Поэтому вводят понятия средней и истинной теплоемкости.

Средней теплоемкостью называется теплоемкость в интервале температур от T_1 до T_2 :

$$C_m = \int_{T_1}^{T_2} = \frac{q}{T_2 - T_1}. \quad (4.1)$$

(В связи с тем, что цена деления шкалы температур по Кельвину и по Цельсию одинаковы, при определении разности температур, мы получим одинаковые численные значения)

В выражении (4.1) q - количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг рабочего тела (газа).

Если же представить себе, что к телу подведено элементарное количество теплоты δq и температура тела повысилась на бесконечно малую величину dT , то:

$$c = \frac{\delta q}{dT} \quad (4.2)$$

будет представлять собой *истинную* теплоемкость.

Различают *массовую*, *объемную* и *мольную* теплоемкости.

Массовая теплоемкость - это количество теплоты, которую необходимо подвести к 1 кг вещества, чтобы нагреть его на один градус. Обозначение: c ; единица измерения кДж/(кг · К).

Объемная теплоемкость – это количество теплоты, которую необходимо подвести к 1 м³ вещества (для газов 1 м³ объема при нормальных условиях), чтобы нагреть его на один градус.

Мольной теплоемкостью называется количество теплоты, которую необходимо подвести к 1 молю вещества, чтобы нагреть его на один градус. Обозначение: μc ; единица измерения кДж/(кмоль · К).

Связь между этими теплоемкостями устанавливается следующими зависимостями, вытекающими из их определений:

$$C = \frac{\mu c}{\mu}; \quad C' = \rho_H \cdot c; \quad C' = \frac{\rho_H \cdot \mu c}{\mu} = \frac{\mu c}{22,4},$$

где - ρ_n и $22,4 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$ – соответственно, плотность и объем одного киломоля при нормальных условиях.

Для практических расчетов теплоемкости всех веществ сводят в таблицы, причем, с целью сокращения объема таблиц, средние теплоемкости приводят в них для интервала температуры от 0 до t (приложение 1).

Для уяснения методики определения средней теплоемкости по указанным таблицам воспользуемся рис.4.1.

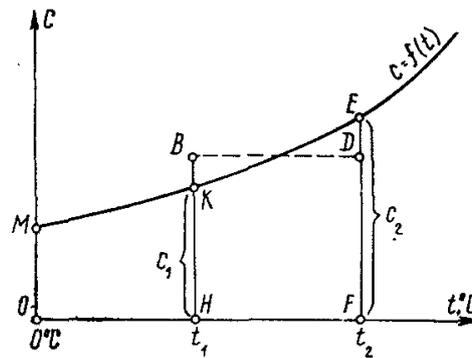


Рисунок 4.1 - Зависимость истинной теплоемкости от температуры

Заштрихованная площадь эквивалента количеству теплоты, необходимому для нагрева 1 кг газа от t_1 до t_2 :

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dT.$$

Ее можно заменить равновесным прямоугольником с основанием $t_1 t_2$ и высотой, равной средней теплоемкости $C_m \int_{t_1}^{t_2}$.

Тогда

$$q = C_m \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1).$$

Аналогично, количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг газа (рабочего тела) от 0 до t_1 и от 0 до t_2 равны, соответственно:

$$q_1 = C_m \int_0^{t_1} t_1 \text{ и } q_2 = C_m \int_0^{t_2} t_2$$

и эквиваленты площадям $31 t_1 0$ и $32 t_2 0$.

Разность этих площадей дает заштрихованную площадь, следовательно:

$$q = q_2 - q_1 = C_m \int_0^{t_2} t_2 - C_m \int_0^{t_1} t_1 = C_m \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1).$$

Откуда

$$C_m \int_{t_1}^{t_2} = \frac{C_m \int_0^{t_2} t_2 - C_m \int_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}. \quad (4.3)$$

4.2 Изохорная и изобарная теплоемкости

Одно и то же рабочее тело, в зависимости от процесса, требует для своего нагревания на один градус ($^{\circ}\text{C}$ и K) различного количества теплоты.

В термодинамических расчетах большое значение имеют:

- теплоемкость в процессе, происходящем при **постоянном объеме**:

$$c_v = \frac{\delta q_v}{dT}, \quad (4.4)$$

- теплоемкость в процессе, происходящим при **постоянном давлении**:

$$c_p = \frac{\delta q_p}{dT}. \quad (4.5)$$

В процессе $\vartheta = \text{const}$ теплота, сообщаемая газу, идет на изменение его внутренней энергии:

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1).$$

В процессе $p = \text{const}$ теплота расходуется на увеличение внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. В соответствии с первым законом термодинамики:

$$q = \Delta u + l$$

или

$$q_p = c_p(T_2 - T_1) = c_v(T_2 - T_1) + l.$$

Работу в изобарном процессе можно определить из следующих соотношений:

$$l = p(\vartheta_2 - \vartheta_1) = R(T_2 - T_1).$$

Тогда

$$c_p = c_v + R$$

или

$$c_p - c_v = R. \quad (4.6)$$

Умножив правую и левую части последнего соотношения на молярную массу, получим:

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}. \quad (4.7)$$

4.3 Теплоемкость смеси газов

При нагревании газовой смеси, подведенная теплота расходуется на нагревание отдельных её компонентов и теплоёмкость смеси определяется по её составу.

При задании состава смеси массовыми долями, подведенную теплоту можно определить следующим образом:

$$Q = cm_{\text{см}}(T_2 - T_1)$$

или

$$Q = c_1m_1(T_2 - T_1) + c_2m_2(T_2 - T_1) + \dots + c_nm_n(T_2 - T_1).$$

Приравнивая правые части этих уравнений, получим:

$$cm_{\text{см}}(T_2 - T_1) = c_1m_1(T_2 - T_1) + c_2m_2(T_2 - T_1) + \dots + c_nm_n(T_2 - T_1),$$

то есть

$$cm_{\text{см}} = c_1m_1 + c_2m_2 + \dots + c_nm_n. \quad (4.8)$$

Разделив левую и правую части уравнения (4.8) на массу смеси $m_{\text{см}}$, найдем:

$$c = \sum_1^n c_i \cdot g_i, \quad (4.9)$$

где c , c_i – массовые теплоемкости смеси и её компонентов;

g_i – массовая доля компонента.

Таким образом массовая теплоемкость смеси равна сумме произведений массовых теплоемкостей газов, входящих в смесь на их массовые доли.

В соответствии с уравнением (4.8), а так же с учетом того, что $m = V\rho$ и $c' = c\rho$ теплоемкость смеси при задании её объемными долями:

$$c' = c'_1z_1 + c'_2z_2 + \dots + c'_nz_n$$

или

$$c' = \sum_1^n c'_i \cdot z_i, \quad (4.10)$$

где c' , c'_i – объемные теплоёмкости смеси и компонентов смеси;

z_i – объемная доля компонента смеси.

Таким образом, объемная теплоёмкость смеси равна сумме произведения объемных теплоёмкостей газов, входящих в смесь на их объемные доли.

Аналогичная молярная теплоёмкость смеси равна сумме произведения молярных теплоёмкостей компонентов на их объёмные доли (см. раздел 3):

$$\mu c = \sum_1^n z_i (\mu c)_i$$

Средняя молярная теплоёмкость различных газов при $p=const$ [1]

| t, °C | μ_{c_p} , кДж/(кмоль · К) | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | O_2 | N_2 | H_2 | CO | CO_2 | SO_4 | H_2O |
| 0 | 29,278 | 29,022 | 28,621 | 29,127 | 35,865 | 38,859 | 33,503 |
| 100 | 29,542 | 29,052 | 28,939 | 29,181 | 38,117 | 40,659 | 33,746 |
| 200 | 29,935 | 29,135 | 29,077 | 29,307 | 40,065 | 42,334 | 34,123 |
| 300 | 30,404 | 29,290 | 29,127 | 29,521 | 41,760 | 43,883 | 34,579 |
| 400 | 30,882 | 29,504 | 29,109 | 29,793 | 43,255 | 43,223 | 35,094 |
| 500 | 31,338 | 29,768 | 29,253 | 30,103 | 44,579 | 46,396 | 35,634 |
| 600 | 31,765 | 30,048 | 29,320 | 30,429 | 45,759 | 47,359 | 36,200 |
| 700 | 32,155 | 30,346 | 29,412 | 30,756 | 46,819 | 48,238 | 36,794 |
| 800 | 32,506 | 30,639 | 29,521 | 31,074 | 47,769 | 48,950 | 37,397 |
| 900 | 32,829 | 30,928 | 29,650 | 31,380 | 48,624 | 49,620 | 38,013 |
| 1000 | 33,122 | 31,200 | 29,793 | 31,669 | 49,398 | 50,165 | 38,624 |
| 1100 | 33,390 | 31,459 | 29,948 | 31,941 | 50,106 | 50,667 | 39,231 |
| 1200 | 33,637 | 31,711 | 30,111 | 32,196 | 50,747 | 51,086 | 39,830 |
| 1300 | 33,867 | 31,945 | 30,291 | 32,431 | 51,329 | - | 40,412 |
| 1400 | 34,081 | 32,167 | 30,471 | 32,657 | 51,865 | - | 40,482 |
| 1500 | 34,286 | 32,376 | 30,651 | 32,862 | 52,355 | - | 41,530 |
| 1600 | 34,479 | 32,569 | 30,836 | 33,055 | 52,807 | - | 42,062 |
| 1700 | 34,663 | 32,753 | 31,016 | 33,235 | 53,226 | - | 42,581 |
| 1800 | 34,839 | 32,921 | 31,196 | 33,407 | 53,611 | - | 43,075 |
| 1900 | 35,010 | 33,084 | 31,376 | 33,566 | 53,967 | - | 43,544 |
| 2000 | 35,174 | 33,235 | 31,552 | 33,712 | 54,298 | - | 44,001 |
| 2100 | 35,333 | 33,381 | 31,727 | 33,855 | 54,603 | - | 44,399 |
| 2200 | 35,488 | 33,520 | 31,895 | 33,984 | 54,888 | - | 44,856 |
| 2300 | 35,638 | 33,645 | 32,062 | 34,110 | 55,152 | - | 45,261 |
| 2400 | 35,789 | 33,683 | 32,266 | 34,227 | 55,399 | - | 45,651 |
| 2500 | 35,932 | 33,880 | 32,389 | 34,340 | 55,629 | - | 46,023 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Круглов, Г.А. Теплотехника. Практический курс / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова, М.В. Андреева М. В. - СПб.: Лань, 2021. - 192 с.
2. Дерюгин, В.В. Тепломассообмен / В.В. Дерюгин, В.Ф. Васильев, В.М. Уляшев – 4-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2021. - 240 с.
3. Горбачев, В.М. Тепломассообмен. Теплопроводность: учебное пособие / М.В Горбачев – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. – 76 с.
4. Крутов, В.И. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена / В.И. Крутов, В.Н. Афанасев, Г.Б.Пастаржецкий -М.: Высш. шк., 1986. -250 с.
5. Баскаков, А.П. Теплотехника. Учебн. для вузов /А.П.Баскаков - М.: Энергоиздат, 1991. -150 с.