

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Кафедра теоретических основ теплотехники (ТОТ)

РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ №1

«Смеси Идеальных газов. Термодинамические процессы с идеальными газами»

Вариант №94

Выполнил: студент гр 2311-22

Чибирёв.А.В

Проверил: к.т.н., доц каф ТОТ

Мухамадиев .А.А

Казань 2023

Содержание:

Введение:

Работа посвящена основным понятиям и законам термодинамики. В первой задаче показывается умение работы со смесью идеальных газов, во второй с термодинамическими процессами с идеальным газом.

Идеальным газом называется воображаемый газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, объем которых мал по сравнению с объемом, занимаемым газом, и отсутствуют силы взаимодействия. [\[стр 12\]](#)

Рабочим телом тепловых машин часто являются смеси различных газов. Если компоненты смеси не вступают в химическую реакцию друг с другом, и каждый компонент смеси подчиняется уравнению состояния идеального газа, то такая смесь может рассматриваться как некоторый новый идеальный газ, для расчетов с которым необходимо знать его среднюю (кажущуюся) молярную массу или удельную газовую постоянную смеси.

Расчетное определение этих величин возможно, если задан состав смеси. Состав смеси задают объемными (молярными) или массовыми долями.

Каждый компонент смеси ведет себя независимо от других, т.е. занимает весь объем, в котором заключена смесь, и оказывает свое, так называемое парциальное, давления на стенки сосуда. Температура всех компонентов смеси одинакова и равна температуре смеси.

В практических расчетах используется удельная теплоемкость. Удельной теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо подвести к единице количества вещества, чтобы изменить его температуру на один градус.

В связи с этим определением различают массовые, объемные или молярные удельные теплоемкости. Теплоемкость идеального газа зависит от характера процесса подвода/отвода теплоты, от атомности газа и температуры. Теплоемкость в процессе при постоянном давлении называется изобарной, а в процессе при постоянном объеме – изохорной. [\[стр 246-248\]](#)

Термодинамический процесс можно наглядно изобразить на P-V и T-S диаграммах.

Задача 1:

Для газовой смеси, заданной объемными долями, требуется определить массовый состав смеси, среднюю (кажущуюся) молекулярную массу смеси через объемные и массовые доли, газовые постоянные компонентов и смеси, плотность смеси при заданных и нормальных условиях, средние мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси при $p=\text{const}$ и $v=\text{const}$ в интервале температур от t_1 до t_2 , а также затраты тепла на нагрев при $p=\text{const}$ 10 м³ и 10 кг смеси в интервале температур от t_1 до t_2 . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Дано: $r(\text{CO}_2)=0.14$; $r(\text{N}_2)=0.77$; $r(\text{H}_2\text{O})=0.05$; $r(\text{O}_2)=0.04$; $P=0.55$ МПа; $t_1=50^\circ\text{C}$; $t_2=410^\circ\text{C}$; $V=10$ м³; $M=10$ кг

Найти: g_i - ?; $\mu_{\text{смеси}}$ - ?; R_i - ?; $R_{\text{см}}$ - ?; ρ - ?; $\rho_{\text{н.у.}}$ - ?; c_p - ?; μc_p - ?; c_p' - ?; c_v - ?; μc_v - ?; c_v' - ?; q - ?;

Решение:

Массовые доли компонентов можно определить по формуле перехода:

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum_1^n \mu_i r_i} \quad [\text{стр 17}] \quad \text{где} \quad \sum_1^n \mu_i r_i = \mu_{\text{смеси}}, \quad \mu_i - \text{молярная масса компонента смеси, } r_i - \text{объемная}$$

доля компонента смеси

$$\mu_{\text{CO}_2} = 12 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} + 16 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} * 2 = 44 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; \quad \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} * 2 + 16 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 14 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} * 2 = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; \quad \mu_{\text{O}_2} = 16 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} * 2 = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{\text{смеси}} = \mu_{\text{CO}_2} * r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{H}_2\text{O}} * r_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{N}_2} * r_{\text{N}_2} + \mu_{\text{O}_2} * r_{\text{O}_2} = \dot{0}$$

$$\dot{0}, 14 * 44 + 18 * 0,05 + 28 * 0,77 + 32 * 0,04 = 29,9 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$g(\text{CO}_2) = \frac{0,14 * 44}{29,9} = 0,206; \quad g(\text{H}_2\text{O}) = \frac{0,05 * 18}{29,9} = 0,03; \quad g(\text{N}_2) = \frac{0,77 * 28}{29,9} = 0,72$$

$$g(\text{O}_2) = \frac{0,04 * 32}{29,9} = 0,04$$

Через массовые доли среднюю (кажущуюся) молекулярную массу смеси определяют по формуле:

$$\mu_{\text{смеси}} = \frac{R_{\mu}}{\sum_1^n R_i g_i} \text{ где } R_{\mu} - \text{ универсальная газовая постоянная, } R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu_i} - \text{ удельная газовая постоянная, } \sum_1^n R_i g_i$$

[стр 13,17-18]

$$R(\text{CO}_2) = \frac{8314}{44} = 188.95 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; R(\text{H}_2\text{O}) = \frac{8314}{18} = 461.89 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}};$$

$$R(\text{N}_2) = \frac{8314}{28} = 296.93 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; R(\text{O}_2) = \frac{8314}{32} = 259.81 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}};$$

$$R_{\text{смеси}} = 188.95 * 0.206 + 461.89 * 0.03 + 296.93 * 0.72 + 259.81 * 0.04 = 276.92 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$\mu_{\text{смеси}} = \frac{8314}{276.92} = 30.02 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Плотность смеси определяют по уравнению состояния идеального газа: $\rho = \frac{P}{RT}$ [стр 14]

$$\rho = \frac{0.55 * 10^6}{276.92 * 323} = 6.15 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ при } t = 50^{\circ} \text{C}$$

$$\rho = \frac{0.55 * 10^6}{278.39 * 653.15} = 2.5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ при } t = 410^{\circ} \text{C}$$

При физических нормальных условиях $T=273\text{К}$, $P=101325 \text{ Па}$

$$\rho_{\text{н.у}} = \frac{101325}{278.39 * 273} = 1.33 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Из справочной таблицы выписываем средние изобарные молярные теплоемкости

[стр 11]:

t, C°	Азот N_2	Кислород O_2	Углекислый газ CO_2	Водяной пар H_2O
0	29.115	29.274	35.860	33.499
100	29.144	29.538	38.112	33.741
200	29.228	29.931	40.059	34.118
300	29.383	30.400	41.755	34.575
400	29.601	30.878	43.250	35.090
500	29.864	31.334	44.573	35.630

Средние изобарные молярные теплоемкости при заданных температурах находим

методом интерполяции: $c_x = c_a + \frac{c_b - c_a}{b - a}(x - a); a < b$

Для $t_1=40^\circ\text{C}$

$$\mu c_p(N_2) = 29.115 + \frac{29.144 - 29.115}{100} * 40 = 29.1266 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(O_2) = 29.274 + \frac{29.538 - 29.274}{100} * 40 = 29.3796 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(CO_2) = 35.860 + \frac{38.112 - 35.860}{100} * 40 = 36.7608 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(H_2O) = 33.499 + \frac{33.741 - 33.499}{100} * 40 = 33.5958 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

Для $t_2=380^\circ\text{C}$

$$\mu c_p(N_2) = 29.383 + \frac{29.601 - 29.383}{100} * 80 = 29.5574 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(O_2) = 30.400 + \frac{30.878 - 30.400}{100} * 80 = 30.7824 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(CO_2) = 41.755 + \frac{43.250 - 41.755}{100} * 80 = 42.9510 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu c_p(H_2O) = 34.575 + \frac{35.090 - 34.575}{100} * 80 = 35.0110 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

Средняя теплоемкость находится по формуле: $c_{t_1}^{t_2} = \frac{c_0^{t_2} * t_2 - c_0^{t_1} * t_1}{t_2 - t_1}$ [стр 38]

$$\mu C_{t_1, pm}^{t_2}(CO_2) = \frac{42.9510 * 380 - 36.7608 * 40}{340} = 43.6792 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu C_{t_1, pm}^{t_2}(H_2O) = \frac{35.0110 * 380 - 33.5958 * 40}{340} = 35.1775 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu C_{t_1, pm}^{t_2}(N_2) = \frac{29.5574 * 380 - 29.1266 * 40}{340} = 29.608 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$\mu C_{t_1, pm}^{t_2}(O_2) = \frac{30.7824 * 380 - 29.274 * 40}{340} = 30.947 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

Мольная теплоемкость смеси находится по формуле: $\mu c_{p, см} = \sum_1^n \mu c_{pi} r_i$; [стр 41]

$$\mu c_{p, см} = 29.608 * 0.75 + 30.947 * 0.07 + 43.683 * 0.13 + 35.177 * 0.05 = 31.810 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

Массовую теплоемкость находим из соотношения: $c = \frac{\mu c}{\mu} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$ [стр 34]

$$c_{pm} = \frac{31.810}{29.86} = 1.065 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

Объемная теплоемкость находится из соотношения: $c' = \frac{\mu c}{22.4} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 * \text{К}}$; [стр 34]

$$c'_{p_{см}} = \frac{31.810}{22.4} = 1.420 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 * \text{К}}$$

Мольную изохорную теплоемкость можно найти из уравнения:

$$\mu c_p - \mu c_v = 8,314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}} \quad [\text{стр 36}]$$

$$\mu c_{v_{см}} = 31.810 - 8.314 = 23.496 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{К}}$$

$$c_{v_{см}} = \frac{23.496}{29.86} = 0.787 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}; c'_{v_{см}} = \frac{23.496}{22.4} = 1.049 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 * \text{К}}$$

Количество теплоты находится по уравнению: $Q = M c_p \Delta t = V c'_p * \Delta t;$

$$Q = 10 * 1,065 * (380 - 40) = 3621 \text{ кДж}$$

$$Q = 20 * 1,420 * 340 = 9656 \text{ кДж}$$

Задача 2:

Газ массой m имеет начальные параметры – давление P_1 и температуру t_1 . После политропного изменения состояния параметра газа стали P_2 и V_2 . Определить характер процесса (сжатие или расширение), конечную температуру t_2 , показатель политропы n , теплоемкость процесса C , работу, тепло, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Определить эти же параметры, а также конечное давление P_2 , если изменение состояния до того же конечного объема V_2 происходит: а) по адиабате; б) по изотерме. Изобразить (без расчета) все процессы в PV и TS диаграммах. Составить сводную таблицу результатов расчета. Теплоемкость газа считать постоянной.

Дано: CO_2 ; $t_1 = 200^\circ\text{C}$; $P_1 = 6.0$ бар; $m = 10.5$ кг; $P_2 = 1.5$ бар; $V_2 = 0.85$ м³

Найти: характер процесса – ?; t_2 – ?; n – ?; c – ?; L – ?; Q – ?; ΔU – ?; ΔH – ?; ΔS – ?; P_2 – ?

Решение: По уравнению состояния идеального газа определяем начальный объем:

$$PV = mRT = \mu V_1 = \frac{mRT_1}{P_1} \text{ где } R = \frac{R_\mu}{\mu} - \text{удельная газовая постоянная } \text{CO}_2.$$

$$R = \frac{8314}{44} = 188.95 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; V_1 = \frac{10.5 * 188.95 * 473}{600000} = 1.56 \text{ м}^3$$

$V_1 > V_2$, значит происходит процесс сжатия газа.

Показатель политропы определяется через связь между параметрами состояния:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \text{ где } n \text{ — это показатель политропы [стр 60]}$$

$$n = \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{\ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{\ln \frac{600000}{150000}}{\ln \frac{0,85}{1,56}} = -2,28$$

Температуру t_2 определяют по формуле: $T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \dot{t} T_2 = 473 \left(\frac{1,56}{0,85}\right)^{-2,28-1} = 64,55 \text{ K}$ [стр 60]

Теплоемкость политропного процесса определяется по формуле: $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$; $n = \frac{n \dot{c}_v - c_p}{n - 1}$

По таблице теплоемкости для многоатомного газа [стр 11]

$$\mu c_v = 29,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{K}}; \mu c_p = 37,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} * \text{K}}$$

Связь между молярной и массовой теплоемкостью:

$$c = \frac{\mu c}{\mu}; c_v = \frac{29,31}{44} = 0,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{K}}; c_p = \frac{37,68}{44} = 0,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{K}};$$

$$c = \frac{-2,28 * 0,67 - 0,86}{-2,28 - 1} = 0,73 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{K}}$$

Для удобства дальнейших расчетов найдем показатель адиабаты k : $k = 1 + \frac{R_\mu}{\mu c_v}$ [стр 56]

$$k = 1 + \frac{8,314}{29,31} = 1,28$$

Работа сжатия газа: $L = l * M$; где $l = c_v \frac{1-k}{n-1} (T_2 - T_1)$ — удельная работа [стр 62,30]

$$l = \frac{0,67 * 1 - 1,28}{(-2,28 - 1)} (64,55 - 473) = -23,36 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \dot{c}$$

$$L = -23,36 * 10,5 = -245,28 \text{ кДж}$$

Общее количество теплоты, подведенное к системе, определяется по формуле:

$$Q = M * q; \text{ где } q = c_v \left(\frac{n-k}{n-1}\right) (T_2 - T_1) \text{ — удельное количество теплоты [стр 29, 61]}$$

$$q = 0.67 \left(\frac{-2.28 - 1.28}{-2.28 - 1} \right) \dot{c}_v (64.55 - 473) = -297.02 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \dot{c}$$

$$Q = 10.5 * (-297.02) = -3118.71 \text{ кДж}$$

Изменение внутренней энергии определяют по формуле:

$$\Delta U = M * \Delta u; \text{ где } \Delta u = c_v (T_2 - T_1) - \text{изменение удельной энергии} [\text{стр } 27, 62]$$

$$\Delta u = 0.67 * (64.55 - 473) = -272.66 = \dot{c} \quad \Delta U = 10.5 * (-272.66) = -2873.43 \text{ кДж}$$

Изменение энтальпии определяют по формуле:

$$\Delta H = M * \Delta h \text{ где } \Delta h = c_p (T_2 - T_1) - \text{изменение удельной энтальпии} [\text{стр } 44, 62]$$

$$\Delta h = 0.86 * (64.55 - 473) = -351.27 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \dot{c}$$

$$\Delta H = 10.5 * (-351.27) = -3688.34 \text{ кДж}$$

Изменение энтропии определяется по формуле: $\Delta S = M * \Delta s$

где Δs – Изменение удельной энтропии в политропном процессе

$$\Delta s = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1} [\text{стр } 46, 62] \quad \Delta s = 0.67 * \left(\frac{-2.28 - 1.28}{-2.28 - 1} \right) \ln \frac{64.55}{473} = -1.45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$\Delta S = 10.5 * (-1.45) = -15.23 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$$

Адиабатный процесс – процесс без изменения энтропии. Уравнение адиабаты называют уравнением Пуассона: $P V^k = \text{const}$ [стр 56]; Показатель адиабаты k был вычислен ранее. $k=1.28$

Давление P_2 можно найти через связь между параметрами состояния в адиабатном

$$\text{процессе: } P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \dot{c} P_2 = 600000 * \left(\frac{1.56}{0.85} \right)^{1.28} = 1305252 \text{ Па} [\text{стр } 56]$$

$$\text{Температуру } T_2 \text{ определяем по отношению: } T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} [\text{стр } 57] = \dot{c}$$

$$T_2 = 473 \left(\frac{1.56}{0.85} \right)^{1.28-1} = 560.66 \text{ К}$$

По первому закону термодинамики, при отсутствии теплообмена с окружающей средой работа адиабатного процесса осуществляется за счет внутренней энергии:

$$dl = -du = \dot{c} l = c_v (T_1 - T_2) [\text{стр } 57-58] \quad l = 0.67 (473 - 560.66) = -58.73 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$L = l * M = \dot{i} L = 10.5 * (-58.73) = -616.67 \text{ кДж} ; \Delta U = -L = 616.67 \text{ кДж}$$

В адиабатном процессе $ds=0$, следовательно $dq=ds \cdot T=0$. $\Delta S=0$, $\Delta Q=0$

$$\Delta H = M * \Delta h \text{ где } \Delta h = c_p (T_2 - T_1) = \dot{i} \Delta h = 0.86 * (560.66 - 473) = 75.39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\Delta H = 10.5 * 75.39 = 791.60 \text{ кДж}$$

Изотермный процесс – процесс, проходящий при постоянной температуре. Уравнение изотермы: $PV = \text{const}$ [стр 54]

Давление P_2 можно найти через связь между параметрами состояния в изотермном

$$\text{процессе: } P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = \dot{i} P_2 = \frac{600000 * 1.56}{0.85} = 1101176 \text{ Па} ; T_2 = T_1 = 473 \text{ К}$$

В случае постоянства температуры в процессе внутренняя энергия и энтальпия остаются постоянными: $\Delta U=0$; $\Delta H=0$ $L = l * M$ где

$$l = RT \ln \frac{V_2}{V_1} - \text{удельная работа изотермного процесса.}$$

$$l = 0.18895 * 473 * \ln \frac{0.85}{1.56} = -54.27 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \dot{i} L = -54.27 * 10.5 = -569.84 \text{ кДж.}$$

По первому закону термодинамики $dU=dQ-dL$. Т.к. $dU=0$, $dQ=dL \Rightarrow Q = -569.84 \text{ кДж}$

$$\text{Изменение энтропии изотермного процесса: } \Delta s = \frac{q}{T} ; \dot{i} \Delta s = \frac{-54.27}{473} = 0.115 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$\Delta S = M * \Delta s = \dot{i} \Delta S = 10.5 * (-0.115) = -1.208 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}$$

Сводная таблица результатов расчета:

Вычисление величин	Политропный процесс	Адиабатный процесс	Изотермический процесс
$V_1, \text{м}^3$	1.56	1.56	1.56
$V_2, \text{м}^3$	0.85	0.85	0.85
$P_1, \text{Па}$	600000	600000	600000
$P_2, \text{Па}$	150000	150000	150000
$T_1, \text{К}$	473	473	473
$T_2, \text{К}$	64.55	560.66	473
Характер процесса	сжатие	сжатие	Сжатие
n	-2.28	1.28	1
$L, \text{кДж}$	-245.28	-616.67	-569.84
$Q, \text{кДж}$	-3118.71	0	-569.84
$\Delta H, \text{кДж}$	-3688.34	791.60	0
$\Delta S, \text{кДж/К}$	-15.23	0	-1.208

Вывод: Зная молярные (или массовые) доли компонентов смеси, можно вычислить основные параметры состава смеси: среднюю (кажущуюся) молярную теплоемкость, газовую постоянную, плотность, удельный объем, парциальное давление компонентов. Зная одну из удельных теплоемкостей (массовую, молярную, объемную, изобарную или изохорную), можно рассчитать другие. Если зависимость теплоемкости от температуры нелинейная, то средняя теплоемкость определяется в интервале температур.

Рассчитав показатель политропы, можно определить, к какому термодинамическому процессу относится данный процесс. Также его можно определить графически, по P-V и T-S диаграммам.

Список Литературы:

- 1) Амирханов Д.Г., Амирханов Р.Д., Курбангалеев М.С., Мухамадиев А.А., Хайруллин И.Х. , Техническая термодинамика / . 2017, с.320-20 ((Гриф КНИТУ или другого вуза))
- 2) Методическое указания Курбангалеев М.С., Мухамадиев А.А., Хайруллин И.Х. , Техническая термодинамика / КНИТУ. 2015, с.56-3,48