

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Кафедра теоретических основ теплотехники (ТОТ)

Расчетное задание №1
**«Смеси идеальных газов. Термодинамические
процессы с идеальным газом»**

Вариант №72

Выполнила: студентка гр. 5121-П
Кириллина Ю. С.

Проверил: к.т.н., доц. каф. ТОТ
Мухамадиев А. А.

Казань 2014

Содержание

Введение.....	3
Задача 1	4
Задача 2.....	7
Вывод.....	12
Список литературы.....	13

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.

Идеальный газ – это модель реального газа, в котором отсутствует межмолекулярное взаимодействие и размерами молекул можно пренебречь по сравнению с размерами межмолекулярного пространства. Понятие идеального газа введено для удобства расчетов параметров состояния.

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.

Теплоемкостью тела называют количество теплоты, необходимое для изменения ее температуры на 1К. В зависимости от того, в каких единицах задано количество теплоты вещества, в расчетах используют 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.

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 $p=\text{const}$ 10нм³ и 10кг смеси в интервале температур от t_1 до t_2 . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Дано:

$r(\text{CO}_2)=0.13$
 $r(\text{N}_2)=0.75$
 $r(\text{H}_2\text{O})=0.05$
 $r(\text{O}_2)=0.07$
 $P=0.45 \text{ МПа}$
 $t_1=40^\circ\text{C}$
 $t_2=380^\circ\text{C}$
 $V=10 \text{ нм}^3$
 $M=10 \text{ кг}$

$g_i - ?$
 $\mu_{\text{смеси}} - ?$
 $R_i - ?$
 $R_{\text{см}} - ?$
 $\rho - ?$
 $\rho_{\text{н.у.}} - ?$
 $c_p - ?$
 $\mu_{c_p} - ?$
 $c_p' - ?$
 $c_v - ?$
 $\mu_{c_v} - ?$
 $c_v' - ?$
 $q - ?$

Массовые доли компонентов можно определить по формуле перехода:

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum_1^n \mu_i r_i}$$

где $\sum_1^n \mu_i r_i = \mu_{\text{смеси}}$, μ_i – молярная масса компонента смеси, r_i – объемная

доля компонента смеси

$$\mu_{\text{смеси}} = 0.13 \cdot 44 + 0.75 \cdot 28 + 0.05 \cdot 18 + 0.07 \cdot 32 = 29.86 \text{ кг / кмоль};$$

$$g(\text{CO}_2) = \frac{0.13 \cdot 44}{29.86} = 0.19;$$

$$g(\text{N}_2) = \frac{0.75 \cdot 28}{29.86} = 0.70;$$

$$g(\text{H}_2\text{O}) = \frac{0.05 \cdot 18}{29.86} = 0.03;$$

$$g(\text{O}_2) = \frac{0.07 \cdot 32}{29.86} = 0.08.$$

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

$$\mu_{\text{смеси}} = \frac{R_{\mu}}{\sum_1^n R_i g_i}$$

где R_{μ} – универсальная газовая постоянная, $R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu_i}$ – удельная газовая

постоянная, $\sum_1^n R_i g_i = R_{\text{смеси}}$

$$R(\text{CO}_2) = \frac{8314}{44} = 188.95 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$R(\text{N}_2) = \frac{8314}{28} = 296.93 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$R(\text{H}_2\text{O}) = \frac{8314}{18} = 461.89 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$R(\text{O}_2) = \frac{8314}{32} = 259.81 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)};$$

$$R_{\text{смеси}} = 188.95 \cdot 0.19 + 296.93 \cdot 0.70 + 461.89 \cdot 0.03 + 259.81 \times 0.08 = 278.39 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$\mu_{\text{смеси}} = \frac{8314}{278.39} = 29.86 \text{ кг} / \text{кмоль}.$$

Плотность смеси определяют по уравнению состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{P}{RT};$$

$$\rho = \frac{0.45 \cdot 10^6}{278.39 \cdot 313.15} = 5.16 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

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

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

Из справочной таблицы выписываем средние изобарные молярные теплоемкости:

Газ	μ_{c_p} , кДж/кмоль·К			
	0	100	300	400
$t, ^\circ\text{C}$				
N_2	29,115	29,144	29,383	29,601
O_2	29,274	29,538	30,400	30,878
CO_2	35,860	38,112	41,755	43,250
H_2O	33,499	33,741	34,575	35,090

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 $t_1=40^\circ\text{C}$

$$\mu_{c_p}(\text{N}_2) = 29.115 + \frac{29.144 - 29.115}{100} \cdot 40 = 29.1266 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(\text{O}_2) = 29.274 + \frac{29.538 - 29.274}{100} \cdot 40 = 29.3796 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(\text{CO}_2) = 35.860 + \frac{38.112 - 35.860}{100} \cdot 40 = 36.7608 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(\text{H}_2\text{O}) = 33.499 + \frac{33.741 - 33.499}{100} \cdot 40 = 33.5958 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{K};$$

Для $t_2=380^\circ\text{C}$

$$\mu_{c_p}(\text{N}_2) = 29.383 + \frac{29.601 - 29.383}{400 - 300} \cdot (380 - 300) = 29.5574 \text{ кДж} / \text{кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(O_2) = 30.400 + \frac{30.878 - 30.400}{400 - 300} \cdot (380 - 300) = 30.7824 \text{ кДж / кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(CO_2) = 41.755 + \frac{43.250 - 41.755}{400 - 300} \cdot (380 - 300) = 42.9510 \text{ кДж / кмоль} \cdot \text{K};$$

$$\mu_{c_p}(H_2O) = 34.575 + \frac{35.090 - 34.575}{400 - 300} \cdot (380 - 300) = 35.0110 \text{ кДж / кмоль} \cdot \text{K}.$$

Средняя теплоемкость находится по формуле:

;;

;;

;;

;;

..

Мольная теплоемкость смеси находится по формуле:

$$\mu_{c_{pсм}} = \sum_1^n \mu_{c_{pi}} r_i;$$

$$\mu_{c_{pсм}} = 29.608 \cdot 0.75 + 30.947 \cdot 0.07 + 43.683 \cdot 0.13 + 35.177 \cdot 0.05 = 31.810 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}};$$

Массовую теплоемкость находим из соотношения:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}};$$

$$c_{pсм} = \frac{31.810}{29.86} = 1.065 \text{ кДж / кг} \cdot \text{K};$$

Объемная теплоемкость находится из соотношения:

$$c' = \frac{\mu c}{22.4} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{K}};$$

$$c'_{pсм} = \frac{31.810}{22.4} = 1.420 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{K}};$$

Мольную изохорную теплоемкость можно найти из уравнения:

$$\mu_{c_p} - \mu_{c_v} = 8.314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}};$$

$$\mu_{c_{vсм}} = 31.810 - 8.314 = 23.496 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}.$$

$$c_{vcm} = \frac{23.496}{29.86} = 0.787 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$c'_{vcm} = \frac{23.496}{22.4} = 1.049 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Количество теплоты находится по уравнению:

$$Q = M \cdot c_p \cdot \Delta t = V \cdot c'_p \cdot \Delta t;$$

$$Q = 10 \cdot 1.065 \cdot (380 - 40) = 3621 \text{ кДж}.$$

$$Q = 10 \cdot 10^{-27} \cdot 1.420 \cdot (380 - 40) = 482.8 \cdot 10^{-26} \text{ кДж}.$$

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:

CO₂
 $t_1=200^\circ\text{C}$
 $P_1=6.0$ бар
 $m=10.5$ кг
 $P_2=1.5$ бар
 $V_2=0.85$ м³

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

По уравнению состояния идеального газа определяем начальный объем:

$$PV = mRT;$$

$$V_1 = \frac{mRT_1}{P_1}; \text{ где } R = \frac{R_u}{\mu} \text{ – удельная газовая постоянная CO}_2.$$

$$R = \frac{8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{K}}{44 \text{ кг/кмоль}} = 188.95 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$V_1 = \frac{10.5 \text{ кг} \cdot 188.95 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \cdot 473 \text{ K}}{600000 \text{ Па}} = 1.56 \text{ м}^3.$$

$V_1 > V_2$, значит происходит сжатие газа.

Показатель политропы определяется через связь между параметрами состояния:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n; \quad n = \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{\ln \frac{V_2}{V_1}};$$

$$n = \frac{\ln \frac{600000}{150000}}{\ln \frac{0.85}{1.56}} = -2.28;$$

Температуру t_2 определяют по формуле:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1};$$

$$T_2 = 473 \left(\frac{1.56}{0.85} \right)^{-2.28-1} = 64.55 \text{ K};$$

Теплоемкость политропного процесса определяется по формуле:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}; \quad c = \frac{n c_v - c_p}{n - 1};$$

По таблице теплоемкости для многоатомного газа

$$\mu c_v = 29.31 \text{ кДж/кмоль} \cdot K;$$

$$\mu c_p = 37.68 \text{ кДж/кмоль} \cdot K.$$

Связь между молярной и массовой теплоемкостью:

$$c = \frac{\mu c}{\mu};$$

$$c_v = \frac{29.31 \text{ кДж/кмоль} \cdot K}{44 \text{ кг/кмоль}} = 0.67 \text{ кДж/кг} \cdot K;$$

$$c_p = \frac{37.68 \text{ кДж/кмоль} \cdot K}{44 \text{ кг/кмоль}} = 0.86 \text{ кДж/кг} \cdot K;$$

$$c = \frac{-2.28 \cdot 0.67 - 0.86}{-2.28 - 1} = 0.73 \text{ кДж/кг} \cdot K.$$

Для удобства дальнейших расчетов найдем показатель адиабаты k :

$$k = 1 + \frac{R_{\mu}}{\mu c_v};$$

$$k = 1 + \frac{8.314 \text{ кДж/кмоль} \cdot K}{29.31 \text{ кДж/кмоль} \cdot K} = 1.28.$$

Работа сжатия газа:

$$L = lM; \text{ где } l = c_v \frac{1-k}{n-1} (T_2 - T_1) - \text{удельная работа}$$

$$l = 0.67 \cdot \frac{1-1.28}{-2.28-1} (64.55 - 473) = -23.36 \text{ кДж/кг};$$

$$L = -23.36 \cdot 10.5 = -245.28 \text{ кДж}.$$

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

$$Q = Mq; \text{ где } q = c_v \left(\frac{n-k}{n-1} \right) (T_2 - T_1) - \text{удельное количество теплоты.}$$

$$q = 0.67 \cdot \left(\frac{-2.28-1.28}{-2.28-1} \right) (64.55 - 473) = -297.02 \text{ кДж/кг};$$

$$Q = 10.5 \cdot -297.02 = -3118.71 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии определяют по формуле:

$$\Delta U = M \Delta u; \text{ где } \Delta u = c_v (T_2 - T_1) - \text{изменение удельной внутренней энергии.}$$

$$\Delta u = 0.67 \cdot (64.55 - 473) = -272.66 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta U = 10.5 \cdot -273.66 = -2873.43 \text{ кДж}.$$

Изменение энтальпии определяют по формуле:

$$\Delta H = M \Delta h; \text{ где } \Delta h = c_p (T_2 - T_1) - \text{изменение дельной энтальпии}$$

$$\Delta h = 0.86 \cdot (64.55 - 473) = -351.27 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta H = 10.5 \cdot 341.70 = -3688.34 \text{ кДж}.$$

Изменение удельной энтропии в политропном процессе определяют по формуле:

$$\Delta s = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1};$$

Изменение энтропии определяется по формуле:

$$\Delta S = M \Delta s.$$

$$\Delta s = 0.67 \cdot \frac{-2.28 - 1.28}{-2.28 - 1} \ln \frac{64.55}{473} = -1.45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta S = 10.5 \cdot -1.45 = -15.23 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}.$$

Адиабатный процесс – процесс без изменения энтропии. Уравнение адиабаты называют уравнением Пуассона:

$$P V^k = \text{const};$$

Показатель адиабаты k был вычислен ранее. $k=1.28$

Давление P_2 можно найти через связь между параметрами состояния в адиабатном процессе:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k;$$

$$P_2 = 600000 \left(\frac{1.56}{0.85} \right)^{1.28} = 1305252 \text{ Па}.$$

Температуру T_2 определяем по отношению:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1};$$

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

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

$$dl = -du.$$

$$l = c_v(T_1 - T_2);$$

$$l = 0.67 \cdot (473 - 560.66) = -58.73 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$L = -58.73 \cdot 10.5 = -616.67 \text{ кДж}.$$

$$\Delta U = -L = 616.67 \text{ кДж}.$$

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

$$\Delta S=0, \quad \Delta Q=0$$

$\Delta H = M \Delta h$; где $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$ – изменение дельной энтальпии

$$\Delta h = 0.86 \cdot (560.66 - 473) = 75.39 \text{ кДж/кг};$$

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

Изотермный процесс – процесс, проходящий при постоянной температуре. Уравнение изотермы:

$$PV = \text{const}.$$

Давление P_2 можно найти через связь между параметрами состояния в изотермном процессе:

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2};$$

$$P_2 = 600000 \frac{1.56}{0.85} = 1101176 \text{ Па};$$

$$T_2 = T_1 = 473 \text{ К}$$

В случае постоянства температуры в процессе внутренняя энергия и энтальпия остаются постоянными

$$\Delta U=0; \quad \Delta H=0$$

$L = lM$; где $l = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ – удельная работа изотермного процесса.

$$l = 0.18895 \cdot 473 \cdot \ln \frac{0.85}{1.56} = -54.27 \text{ кДж/кг};$$

$$L = -54.27 \cdot 10.5 = -569.84 \text{ кДж}.$$

По первому закону термодинамики $dU=dQ-dL$. Т.к. $dU=0$, $dQ=dL$

$$Q = -569.84 \text{ кДж.}$$

Изменение энтропии изотермного процесса:

$$\Delta s = \frac{q}{T};$$

$$\Delta s = \frac{-54.27}{473} = -0.115 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta S = M \Delta s;$$

$$\Delta S = 10.5 \cdot -0.115 = -1.208 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}.$$

Сводная таблица результатов расчета:

Вычисленные величины	Политропный процесс	Адиабатный процесс	Изотермный 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	1305252	1101176
$T_1, \text{К}$	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
$\Delta U, \text{кДж}$	-2873.43	616.67	0
$\Delta H, \text{кДж}$	-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. Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др.; Под ред. В.Н.Луканина. – 3-е изд., испр. – М.Ж Высш. шк., 2002. - 671 с.
2. Техническая термодинамика: Рук-во к лаб.работам / Сост. И.Х.Хайруллин., Казань, КХТИ, 1995, 48с.