

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра химических технологий

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
«ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА»**

**для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии»**

Владимир – 2016 г.

Данные методические указания включают рекомендации по содержанию и выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техническая термодинамика и теплотехника» для студентов направления 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», «Техническая термодинамика и теплотехника».

рабочей программы дисциплины «

Рассмотрены и одобрены на
заседании УМК направления
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие
процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии»
Протокол № 1 от 5.09.2016 г.
Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ

Лабораторная работа 1 Функции состояния термодинамических процессов. Первый закон термодинамики.

Теоретическая часть

1. Основными функциями состояния являются: внутренняя энергия U , Дж; энтальпия H , Дж; энтропия S , Дж/К. Все перечисленные функции являются аддитивными величинами, т.е. функция состояния системы равна сумме соответствующих функций составляющих ее подсистем.

$$U = \sum U_i; H = \sum H_i; S = \sum S_i \quad [1]$$

Из аддитивности этих функций следует также $U = M u; H = M h; S = M s$ [2]

где u , Дж/кг; h , Дж/кг; s , Дж/(кг К) - соответственно удельные внутренняя энергия, энтальпия и энтропия. Таким образом, выражение примет вид

$$\oint du = 0; \Delta u = \int_1^2 du = u_2 - u_1; \quad (3)$$

$$\oint dh = 0; \Delta h = \int_1^2 dh = h_2 - h_1; \quad (4)$$

$$\oint ds = 0; \Delta s = \int_1^2 ds = s_2 - s_1. \quad (5)$$

Внутренняя энергия системы включает в себя энергию теплового движения составляющих ее молекул и потенциальную энергию их взаимодействия.

В случае идеального газа энергия взаимодействия молекул равна нулю, а энергия их теплового движения изменяется только в зависимости от температуры, следовательно,

$$du = c_v dT, \quad (6)$$

откуда при $c_v = \text{const}$ (в дальнейшем это условие будет соблюдаться по умолчанию) получаем $\Delta u = c_v(T_1 - T_2)$ [7]

Для практических расчетов, требующих учета зависимости c_v от температуры, имеются эмпирические формулы и таблицы удельной (часто молярной) внутренней энергии, отсчитанной от состояния, которое указывается в заголовке таблицы. Это позволяет определять изменение внутренней энергии в любом процессе.

2. *Внутренняя энергия системы.* При расчетах с идеальными газами молярная внутренняя энергия смеси им определяется по выражению

$$u_{\mu} = \sum r_i u_{i\mu} \quad [8]$$

где u_i - молярная внутренняя энергия i -го компонента, Дж/кмоль, определяемая по формулам или таблицам при температуре смеси.

Если смесь задана массовыми долями, то соответственно

$$u = \sum q_i u_i \quad [9]$$

3. *Энтальпия* – тепловая функция, выведенная по выражению

$$H = U + pV \quad [10]$$

для удельной энтальпии можно записать

$$h = u + pv \quad [11]$$

В случае идеального газа это уравнение принимает вид

$$h = u + RT \quad [12]$$

$$dh = (c_v + R) dT \quad [12]$$

Так как по уравнению Майера $c_v + R = c_p$ то

$$dh = c_p dT \quad [13]$$

$$\Delta h = c_p (T_1 - T_2) \quad [14]$$

Разделив (6.13) на (6.7), получаем

$$\Delta h / \Delta u = c_p / c_v = k \quad [15]$$

т.е. независимо от характера термодинамического процесса изменение энтальпии в нем в k раз больше изменения внутренней энергии.

Если необходимо учесть зависимость теплоемкости от температуры, то изменение энтальпии определяют по эмпирическим формулам или с помощью таблиц удельной (молярной) энтальпии, отсчитанной от стандартного состояния. Для расчетов смесей идеальных газов применяют соотношения, аналогичные (8) и (9), т.е. $h_i = \sum r_i h_{i0}$ [16]; $h = \sum q_i h_i$ [17]

Лабораторная работа №3 Энтропия. Первый закон термодинамики

Эта функция возникла в ходе теоретического поиска наиболее благоприятных условий превращения теплоты в работу в тепловых двигателях, т.е. при решении сугубо прикладной задачи (Клаузиус, 1822-1888).

Согласно (5) дифференциал этой функции для элементарного обратимого процесса с 1 кг газа определяется по выражению $ds = dq/T$ [18]. Учитывая, что $dq = cdT$, это выражение можно переписать в виде

$$ds = cdT/T [19]. \quad \text{Откуда при } c = \text{const } ds = c \ln T_2/T_1 [20].$$

Как внутренняя энергия и энтальпия, энтропия определяется с точностью до аддитивной постоянной.

5. *Первый закон термодинамики* является частным случаем закона сохранения и превращения энергии и гласит: количество энергии подведенное к телу в данной термической системе в форме теплоты, идет на изменение его энергии и на совершение этим телом внешней работы. В общем случае энергия ΔE передается системе в виде теплоты Q и работы L . $\Delta E = Q + L$ [7.21]

Работу окружающей среды над рабочим телом можно заменить работой преодоления рабочим телом сил окружающей среды, которая численно равна L но противоположна по направлению, т.е со знаком минус, обозначим L^* . Тогда уравнение примет вид: $Q = \Delta E + L^*$ [22]- математическое выражение первого закона термодинамики.

Первый закон термодинамики для рабочего тела, находящегося в относительном покое (закрытая система) из-за того, что кинетическая энергия равна нулю, математически можно записать $Q = \Delta U + L$, L – работа расширения или сжатия для m кг рабочего тела, Дж. Для 1 кг рабочего тела $q = \Delta u + l$. [23] Элементарная работа сжатия (расширения) 1 кг рабочего тела $\delta l = p dv$ [24]. δ - знак неполного дифференциала. При расширении до определенного объема рабочее тело совершит работу $l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ [25] и первый закон термодинамики можно представить в виде $q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv$ [26]. Энергию тела можно рассматривать состоящей из внешней E_v и внутренней U ; $E = E_v + U$ [27]

б. *Кинетическая и потенциальная энергии.* Внешняя энергия тела E_v представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергий этого тела. Кинетическая энергия, если пренебречь энергией вращения тела вокруг центра инерции равна $mc^2/2$, где c скорость центра инерции тела, м/с; m – масса тела. Единица кинетической энергии равна $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$.

Потенциальная энергия равна mgH , где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H – высота, м.

В общем случае изменение внешней энергии тела составит

$$\Delta E_v = [m(c_2^2 - c_1^2)]: 2 + mg(H_2 - H_1) [28]$$

Согласно первому закону внутренняя энергия системы изменяется только при ее взаимодействии с окружающей средой. Это означает, что величина внутренней энергии не зависит от того, установилось ли в системе внутреннее равновесие. Поэтому изменение внутренней энергии системы будет одинаковым независимо от того, оказано ли внешнее воздействие равномерно на всю систему в целом или только на ее часть. Это же относится к энтальпии. По свойству полного дифференциала,

поэтому из первого закона термодинамики следует

$$\oint dU = 0 \text{ и } \oint dH = 0, \quad (29)$$

$$\oint dQ = \oint dL = \oint dL_0 \quad (30)$$

т.е. при осуществлении кругового процесса в тепловом двигателе нельзя получить работы "из ничего". Такой гипотетический двигатель называют вечным двигателем (perpetuummobile) первого рода. В связи с этим первый закон термодинамики нередко называют принципом невозможности перпетууммобиле первого рода.

В соответствии с первым законом термодинамики нельзя построить тепловой двигатель, производящий работу против внешних сил (внешнюю работу) без затраты теплоты.

Задание:

- Изучить теоретическую часть;
- Дать ответы на поставленные вопросы;

Вопросы:

1. Основными функциями состояния
 2. Внутренняя энергия системы.
 3. Энтальпия
 4. Энтропия.
- 5.Первый закон термодинамики
- 6.Кинетическая и потенциальная энергии (по первому закону термодинамики)

Подготовить отчет

Лабораторная работа № 3 Работа изобарического процесса

Теоретическая часть

Работа изобарического процесса Процесс, идущий при постоянном давлении, называется изобарическим.. Подставляя в уравнение [2.11] $P=\text{const}$ и интегрируя получаем:

$$L=nP(V_2 - V_1)[5.16]; \quad L=nR(T_2 - T_1) [5.17]$$

Количество тепла отданное или полученное газом равно

$$Q=n\bar{C}_p(T_2-T_1)[5.18]; \quad Q=n\bar{C}_p T(V_2-V_1)/V_1[5.19]$$

где \bar{C}_p - средняя молярная теплоемкость газа в пределах температур T_2 и T_1 при постоянном давлении, n - число киломолей газа, участвующего в процессе.

Как следует из первого закона термодинамики, все тепло, сообщенное газу при изобарическом процессе идет на изменение его внутренней энергии, на повышение температуры. Подробный анализ уравнения [5.19] показывает, что на повышение температуры газа расходуется $Q(1/\chi)$, а на работу расширения $Q[1 - (1/\chi)]$ единиц тепла. Здесь величина χ представляет отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости его при постоянном объеме. Данные приведены в табл. 5.3

Таблица 5.3.

Значение величины χ - отношения теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости его при постоянном объеме для некоторых газов.

Газ	$\chi = \bar{C}_p / \bar{C}_v$	газ	$\chi = \bar{C}_p / \bar{C}_v$
Азот	1,404	Аммиак	1,31
Аргон	1,67	Ацетилен	1,26
воздух	1,4	водород	1,41
водяные пары	1,324	гелий	1,67
кислород	1,401	метан	1,31
окись углерода	1,404	пропилен	1,17
сероводород	1,32	углекислый газ	1,304
этан	1,41	этилен	1,255

Пример 5.3 Произвести расчет работы при расширении 5 кмоль газа при его расширении от объема 20 м^3 до 40 м^3 при постоянном давлении 400 кН/м^2 .

Решение Подставляя значение в уравнение [5.16] получим

$$L = nP(V_2 - V_1) = 5 \cdot 400 \cdot (40 - 20) = 40000 \text{ кДж} = 40 \text{ МДж}$$

Пример 5.4 Какое количество тепла необходимо подвести к 8 кмоль газа, чтобы повысить его температуру с 10°C до 90°C , если давление газа остается постоянным $0,1 \text{ МН/м}^2$; средняя теплоемкость газа в пределах этих температур равна $32,5 \text{ Дж/моль}$.

Подсчитать: 1) какая часть тепла при этом расходуется на повышение температуры газа и какая часть на работу его расширения; 2) теплоемкость газа при постоянном объеме.

Решение Из уравнения [5.18] находим

$$Q = 8 \cdot 32,5 \cdot (363 - 283) = 20800 \text{ кДж}$$

Работа расширения газа определится из уравнения [5.17]

$$L = nR(T_2 - T_1) = 8 \cdot 8,1344 \cdot (363 - 283) = 5206,016 \text{ кДж} (= Q_1)$$

На повышение температуры расходуется часть тепла

$$Q_1 / Q = 5206,016 \text{ кДж} / 20800 \text{ кДж} = 0,2502, \text{ или } 25,02\%$$

Теплоемкость газа при постоянном давлении определится из соотношения

$$\text{а) } \chi = \bar{C}_p / \bar{C}_v \text{ и } \text{б) } Q_1 = Q[1 - (1/\chi)], \text{ откуда } Q_1 / Q = 1 - \bar{C}_v / \bar{C}_p$$

$$\text{или } \bar{C}_v = \bar{C}_p - \bar{C}_p \cdot Q_1 / Q = 32,5 - 32,5 \cdot 0,2502 = 24,3685 \text{ Дж/моль}$$

В зависимости от условий проведения процесса для расчета средней мольной теплоемкости газа при температурах от 0 до t°С пользоваться данными, представленными в табл. 5.6 или в табл. 5.7

Лабораторная работа 4 Произвести расчет работы при расширении n кмоль газа при его расширении от объема $V_1 \text{ м}^3$ до $V_2 \text{ м}^3$ при постоянном давлении $P \text{ кН/м}^2$.

Таблица 5.4.

Варианты задания 5.3.

Вариант	Количество газа, n кмоль	$P \text{ кН/м}^2$	$V_1 \text{ м}^3$	$V_2 \text{ м}^3$
1	6	100	20	150
2	4	110	30	200
3	3	120	40	250
4	2	130	50	300
5	8	160	60	350
6	7	170	20	400
7	9	180	30	450
8	5	200	40	500
9	6	210	50	550
10	4	200	60	600
11	3	210	20	650
12	2	220	30	700
13	8	240	40	750
14	7	260	50	800
15	9	180	60	550

Вариант	Количество газа, n кмоль	P кН/м ²	V_1 м ³	V_2 м ³
16	5	200	20	600
17	4	210	30	650
18	8	220	40	700
19	7	240	50	750
20	9	260	60	800

Лабораторная работа 5 Какое количество тепла необходимо подвести к n кмоль газа, чтобы повысить его температурус t_1 °С до t_2 °С, если давление газа остается постоянным P кН/м²; средняя теплоемкость газа в пределах этих температур равна \bar{C}_p (табл. 5.6.) Дж/моль. Подсчитать: 1) какая часть тепла при этом расходуется на повышение температуры газа и какая часть на работу его расширения; 2) теплоемкость газа при постоянном объеме.

Таблица 5.5.

Варианты задания 5.4.

Вариант	Газ	Количество газа, n кмоль	P кН/м ²	t_1 °С	t_2 °С
1	Ar	6	60	20	150
2	H ₂	4	20	30	200
3	N ₂	3	10	40	250
4	He	2	13	50	300
5	O ₂	8	10	60	350
6	CO	7	70	20	200
7	NO	9	80	30	250
8	SO ₂	5	100	40	200
9	CO ₂	6	110	50	550
10	H ₂ S	4	26	60	200
11	H ₂ O	3	20	100	250
12	CO	2	20	30	100
13	NH ₃	8	240	10	150
14	CH ₄	7	260	20	200
15	Ar	9	60	20	150
16	H ₂	5	20	30	200
17	N ₂	4	10	40	250

18	He	8	13	50	300
19	O ₂	7	10	60	350
20	CO	9	70	20	200

Средняя молярная теплоемкость газа при температурах от 0 до $t^{\circ}\text{C}$ при нормальном давлении представлена в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Температурная зависимость средней молярной теплоемкости газов от 0 до $t^{\circ}\text{C}$ при нормальном давлении

Газ	Температура, $^{\circ}\text{C}$							
	0	100	200	300	400	500	600	700
H ₂	28,8	29,0	29,1	29,15	29,2	29,3	29,4	29,5
O ₂	29,3	29,6	30,1	30,5	30,9	31,3	31,8	32,0
N ₂	28,4	28,7	29,0	29,4	29,6	30,0	30,3	30,6
CO	28,42	28,9	29,2	29,6	29,9	30,2	30,5	30,8
CO ₂	37,7	39,2	40,6	41,9	43,2	44,4	45,5	46,5
CH ₄	33,4	36,6	39,8	42,0	45,5	48,3	50,9	53,3
H ₂ O, H ₂ S	32,5	33,2	33,8	34,5	35,1	35,6	36,0	36,6
NH ₃	34,7	36,2	37,8	39,4	40,8	42,3	43,7	45,1
NO	28,5	29,0	29,5	29,9	30,3	30,6	31,0	31,3
C ₂ H ₄	39,4	42,1	48,6	53,3	57,9	62,5	67,0	71,7
SO ₂	41,2	42,4	43,5	44,7	45,8	46,6	47,5	48,8
C ₂ H ₂	46,2	47,8	49,6	51,3	53,0	54,4	56,0	57,4
воздух	28,6	29,0	29,3	29,7	30,0	30,3	30,6	30,9
CHON	35,2	37,4	39,6	41,21	43,8	45,9	47,8	49,5
CH ₃ OH	49,0	53,7	57,0	62,8	65,8	70,0	74,2	-
C ₂ H ₅ OH	74,6	80,5	86,6	92,2	97,2	101,4	105,2	108,2
HCOOH	54,0	57,8	61,6	64,7	66,2	68,3	70,7	-

Задание:

- Изучить теоретическую часть;
- Дать ответы на поставленные вопросы по работе изобарического процесса;
- Привести решение примеров;

- Представить решение заданий 5.3 , 5.4 по своему варианту

Подготовить отчет