

Лапшина С.В.

**ТЕПЛОТЕХНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
АГРЕГАТОВ
(СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ)**

Учебное пособие

**Волжский
2022**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С.В. Лапшина

**ТЕПЛОТЕХНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
АГРЕГАТОВ
(СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ)**

Электронное учебное пособие



Волжский
2022

УДК. 621.1(07)
ББК 31.1я73
Л 248

Рецензенты:

к.т.н., ведущий инженер-конструктор ООО «КОМЕД»

Харитонов В.Н.;

Главный инженер проекта ООО «Волжпроект»

Афанасьева Е.Е.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Лапшина, С.В.

Теплотехника металлургических агрегатов (сборник лабораторных работ) [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.В. Лапшина; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 176 КБ). – Волжский, 2022. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-4534-9

Содержит сведения о методах расчета затрат материальных и энергетических ресурсов, необходимых для осуществления производства, причинах, приводящих к увеличению затрат ресурсов.

Изложены основы термодинамического анализа процессов химической технологии, показаны возможности его применения для снижения энергетических затрат на осуществление производства. Приведены примеры расчета и оптимизации затрат материальных и энергетических ресурсов.

Рассмотрены технические приемы, позволяющие уменьшить потребление материальных и энергетических ресурсов.

В учебном пособии приводятся варианты лабораторных работ для студентов, методические указания по их выполнению и сведения по характеристикам сред и материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению бакалавриата 22.03.02 «Металлургия», профиль подготовки «Обработка металла давлением» всех форм обучения и подготовлено в полном соответствии с ФГОС.

Ил. 12, табл. 10, библиограф.: 15 назв.

ISBN 978-5-9948-4534-9

© Волгоградский государственный
технический университет, 2022

© Волжский политехнический
институт, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Список обозначений	4
Лабораторная работа № 1	7
Топливо, газовые смеси и теплоемкость	
Лабораторная работа № 2	
Термодинамические процессы и циклы с газообразным рабочим телом	16
Лабораторная работа № 3	
Исследование теплоотдачи при поперечном обтекании трубы потоком воздуха	22
Лабораторная работа № 4	
Стационарные методы определения коэффициента теплопроводности	30
Лабораторная работа № 5	
Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло	35
Лабораторная работа № 6 Исследование термодинамических процессов в поршневом компрессоре	48
Лабораторная работа №7	
Исследование работы теплового насоса (парокомпрессионного типа)	65
Приложения	72
Рекомендуемая литература	77

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

\dot{a}	– коэффициент температуропроводности, $[m^2/c]$;
b	– скорость звука; $[м/с]$
\tilde{N}_i	– коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;
$c, c_D, c_v, c_n, c_z,$ $c_o, \tilde{n}_{i,\tilde{n}\tilde{a}}$	– соответственно массовая теплоемкость, теплоемкость при постоянном давлении, удельном объеме при произвольных значениях параметров (политропная), теплоемкость горючего; окислителя; продуктов сгорания, $[Дж/кг \cdot ^\circ C]$;
D	– диаметр аппарата, $[м]$;
d	– диаметр трубы, канала, $[м]$;
F	– поверхность теплоотдачи, $[м^2]$;
f	– площадь поперечного сечения канала, $[м^2]$;
g	– ускорение свободного падения, $[м/с^2]$;
\dot{I}	– энтальпия, $[Дж]$;
h	– удельная энтальпия, $[Дж/кг]$;
\dot{j}_i	– плотность теплового потока, $[Вт/м^2]$;
K_i	– коэффициент теплопередачи, $[Вт/м^2 \cdot ^\circ C]$;
K_R	– линейный коэффициент теплопередачи, $[Вт/м \cdot град]$;
k	– показатель адиабаты;
L	– работа, $[Дж]$;
l	– удельная работа, $[Дж/кг]$;
M	– молекулярная масса, $[кг/моль]$;
$m, m_z, m_o, m_{n.c2},$ $m_n, m_{ж}, m_b^0$	– соответственно масса, масса горючего, масса окислителя, масса продуктов сгорания, масса пара, масса жидкости, масса воздуха, необходимого для сжигания одного кг топлива, $[кг\ воздуха/кг\ топлива]$;
n	– показатель политропы;

p	– давление общее в системе, [Па];
Δp	– перепад давления, [Па];
Q_t	– количество теплоты, [Дж];
q_t	– удельное количество теплоты, [Дж/кг];
q_v, q_m	– соответственно объемный расход, массовый расход;
q_v^p, q_m^p	– количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива с учетом теплоты конденсации водяных паров (высшая теплота сгорания), низшая теплота сгорания горючего, [Дж/кг];
R	– универсальная газовая постоянная, [Дж/моль · °K];
R_μ	– газовая постоянная, [Дж/кг · °K];
r	– теплота конденсации, [Дж/кг];
S	– энтропия, [Дж/°K];
s	– удельная энтропия, [Дж/кг · °C];
θ	– температура, [°K];
t, t_z, t_o, t_n, t_z	– соответственно температура, температура горючего при поступлении его в зону реакции, окислителя, начала реакции, температура конца сгорания (адиабатная температура) [°C];
Δt	– температурный напор, [°C];
U	– внутренняя энергия, [Дж];
u	– удельная внутренняя энергия, [Дж/кг];
V	– объем, [м³];
V_{II}	– объем «вредного пространства» (мертвого), [м³];
v	– скорость, [м/с];
$\alpha_K, \alpha_L, \alpha_t$	– соответственно коэффициент конвективной теплоотдачи, коэффициент теплоотдачи за счет лучистого теплообмена, коэффициент теплоотдачи, Вт/м² · °C;
β_T	– коэффициент термического расширения, [1/град];

$\delta_{\bar{n}\partial}$	– толщина стенки, $[м]$;
ε	– степень сжатия газа в ступени компрессора;
ε	– степень черноты тела;
λ	– коэффициент теплопроводности, $[Вт/м \cdot ^\circ C]$;
μ	– динамический коэффициент вязкости, $[Па \cdot с]$;
v', v'', v_μ	– соответственно удельный объем
ν	– кинематический коэффициент вязкости, $[м^2/с]$;
ρ	– плотность вещества, $[кг/м^3]$;
τ	– время, $[с^{-1}]$;
ξ	– коэффициент полноты сгорания горючего;

Числа подобия:

$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$	– число Нуссельта;
$Pe = \frac{v \cdot d}{\dot{a}}$	– число Пекле;
$Pr = \frac{\nu}{a}$	– число Прандтля;
$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$	– число Рейнольдса;
$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta_T \cdot \Delta t$	– число Грассгофа;

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ТОПЛИВО, ГАЗОВЫЕ СМЕСИ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучения процессов сгорания топлива

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2. 1. Составления теплового баланса процесса горения.
- 2.2. Определения теоретически необходимого и действительного коэффициента избытка воздуха.
- 2.3. Определения температуры горения
- 2.4. Определения состава продуктов сгорания

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вся энергия, которую человек использует в своей практике, производится первоначально в виде тепловой энергии, генерируемой (получаемой) в результате химических (например, горение топлива), ядерных реакций (деление урана). Затем тепловая энергия трансформируется и используется для получения различных видов энергии. На рисунке 1.1 представлена схема генерации и трансформации энергии на теплоэлектростанциях (ТЭС) или атомной электростанции.

Топливо сжигается в специальных устройствах – топках. В результате сжигания получают продукты горения, газы, нагретые до высокой температуры. При сжигании топлива ставится задача получить продукты горения с наиболее возможно высокой температурой. При этом весь энергетический потенциал, имеющийся в топливе, передается продуктам горения. Происходит трансформация энергетического потенциала в тепловую энергию продуктов горения. В дальнейшем преобразования в различные виды энергии обеспечиваются за счет трансформации энергии продуктов горения (топочных газов).

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В топке сжигается топливо при определенных условиях. В качестве окислителя используется воздух с температурой T_1 . Заданы также коэффициенты избытка воздуха α и коэффициент полноты сгорания ξ (приведена его зависимость от коэффициента избытка воздуха). Определить теоретическое значение максимальной температуры горения T_z . Теплотой, вносимой топливом, пренебречь.

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Условие А, вид топлива В, T_1 , α и ξ берутся из таблицы 1.1 в соответствии с вариантом работы.
2. Характеристики топлива берутся из приложения (табл. П.1.1).
3. Формулы средних изохорных массовых теплоемкостей приведены в приложении (табл. П.1.2).
4. Результаты расчета сводятся в таблицу 1.2.

Таблица 1.1

Исходные данные

п/п	топливо	температура, °С		коэф. избытка воздуха	коэф. полноты сгорания
		воздуха	топлива		
1	бензин	-20	20	по выбору для каждого из	
2	бензин	10	25		
3	бензин	20	30		
4	керосин	25	-10		
5	керосин	30	0		
6	керосин	40	10		
7	этанол	30	-30		
8	этанол	20	-25		
9	этанол	0	-20		

10	метанол	5	10	вариантов, в зависимости от желаемой полноты сгорания топлива	$\ln(1 - \zeta) = -b \cdot \alpha$ выражение одинаково для каждого из вариантов
11	метанол	10	20		
12	метанол	15	25		
13	метан	-30	-35		
14	метан	-20	-30		
15	метан	-10	-25		
16	метан	0	-20		
17	пропан	10	10		
18	пропан	0	0		
19	пропан	15	15		
20	пропан	30	30		
21	бутан	10	15		
22	бутан	0	25		
23	бутан	10	35		
24	бутан	25	40		

Задание. В соответствии с исходными данными предложенного варианта определить температуру получаемых продуктов горения топлива.

5.1 Определение температуры продуктов горения топлива

Процесс сжигания топлива является первым шагом в производстве электрической энергии на тепловых электростанциях. Сжигание топлива позволяет получить продукты горения (топочные газы). В свою очередь, топочные газы дают возможность произвести водяной пар в паровых котлах. Затем с помощью пара производится механическая энергия (в паровых турбинах). Механическая энергия паровых турбин трансформируется с помощью электрогенераторов в электрическую энергию. Расчет сжигающего устройства (топки) ведется на основании уравнений материального и теплового балансов.

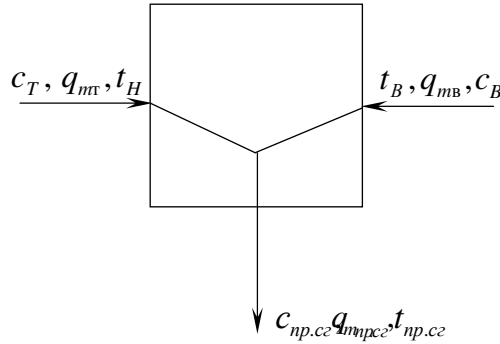


Рис. 1.1. Расчетная схема для процесса сжигания топлива

Материальный баланс сжигающего устройства представляет собой закон сохранения вещества. Количество образующихся продуктов сгорания равно сумме количеств поданных в устройство топлива и окислителя:

$$q_{m_{np.c2}} = q_{m_T} + q_{m_T} \cdot m_B^0 \cdot \alpha = q_{m_T} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha) \quad (1.1)$$

Из уравнения материального баланса определяем расход продуктов горения:

$$q_{m_{np.c2}} = q_{m_T} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha) \quad (1.2)$$

Температура конца сгорания определяется из уравнения теплового баланса сжигающего устройства для стационарного режима его работ:

$$\xi \cdot q_{m_m} \cdot q_n^p + c_z \cdot q_{m_m} \cdot t_n + c_v \cdot q_{m_B} \cdot t_n = q_{m_T} \cdot c_{n.c2} \cdot t_{np.c2} \quad (1.3)$$

Тепловой баланс представляет собой математическую запись закона сохранения энергии. В этом уравнении первое слагаемое означает количество теплоты, образующееся в результате сгорания горючего; второе – количество теплоты, вносимое горючим в зону реакции; третье – количество теплоты, вносимое окислителем в зону реакции. В качестве окислителя используется кислород воздуха. Правая часть уравнения означает количество теплоты, содержащейся в продуктах сгорания. Неизбежные потери энергии за счет контакта с окружающей средой не учитываются.

Массовый расход топлива является постоянной величиной и на него можно сократить. Температура продуктов горения будет равна:

$$t_{np} = \frac{c_T}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_T + \frac{m_B^0 \cdot \alpha \cdot c_B}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_H + \frac{\zeta \cdot q_H^P}{c_{np} \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \quad (1.4)$$

Если предположить, что $c_T \approx c_B \approx c_{np} = c$, то будем иметь:

$$t_{np} = \frac{1}{(1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_n + \frac{m_B^0 \cdot \alpha}{(1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \cdot t_B + \frac{\zeta \cdot q_H^P}{c \cdot (1 + m_B^0 \cdot \alpha)} \quad (1.5)$$

Это уравнение позволяет произвести приближенную оценку температуры. Это значение температуры продуктов горения может использоваться как ориентировочная оценка. Для более точного определения температуры продуктов горения необходимо произвести более точный расчет.

В нем учитывается содержание каждого компонента газовой смеси, его теплоемкость и зависимость полноты сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха, подаваемого на сжигание топлива.

Теплоту сгорания топлива можно определить по формуле Менделеева:

низшая теплота сгорания

$$q_H^P = 393,3 \cdot m_C + 125,6 \cdot m_H - 109 \cdot (m_O - m_S) - 225,2 \cdot (9 \cdot m_H + m_W), \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг топлива}} \right], \quad (1.6)$$

высшая теплота сгорания

$$q_B^P = q_H^P + 25,2 \cdot (9 \cdot m_H + m_W), \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг топлива}} \right] \quad (1.7).$$

В состав углеводородного топлива чаще всего входят углерод, водород, сера, кислород. Также может содержаться вода (например, в каменном угле). В таблице содержатся значения теплот сгорания различных компонентов топлива, теоретическое значение количества кислорода и воздуха, необходимых для сжигания.

Изобарная массовая теплоемкость смеси газов в интервале температур $(0 \dots T_z)$ К определяется по уравнению:

$$c_p = \sum_1^n m_i \cdot c_{pi} \quad (1.8)$$

Для исходной смеси, состоящей из топлива и воздуха, теплоемкость определяется по уравнению:

$$c_p = \frac{1}{1 + \alpha \cdot m_B^0} \cdot c_{pm} + \frac{m_B^0}{1 + \alpha \cdot m_B^0} \cdot c_{pB}. \quad (1.9)$$

Для продуктов горения:

$$c_{p\text{ н.сг}} = m_{CO_2} \cdot c_{p\text{ CO}_2} + m_{H_2O} \cdot c_{p\text{ H}_2O} + m_{O_2} \cdot c_{p\text{ O}_2} + m_{N_2} \cdot c_{p\text{ N}_2}. \quad (1.10)$$

Массовые доли компонентов продуктов горения. В результате горения топлива в продуктах сгорания содержатся: пары воды, двуокиси углерода, серы, азот воздуха и избыток окислителя.

Количество влаги определяется соотношением:

$$m_{H_2O} = \frac{9 \cdot m_{тН}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.11)$$

Количество диоксида углерода:

$$m_{CO_2} = \frac{3,67 \cdot m_{тC}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.12)$$

Количество диоксида серы:

$$m_{SO_2} = \frac{2 \cdot m_{тS}}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.13)$$

Кроме того, надо учесть, что в продукты сгорания переходит практически весь азот поданного для горения воздуха:

$$m_{N_2} = \frac{0,77 \alpha \cdot m_{возд}^0}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \quad (1.14)$$

где 0,77 – массовая доля содержания азота в воздухе.

А также кислород, содержащийся в избыточной части поданного воздуха:

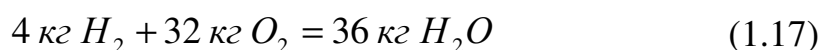
$$m_{I_2} = \frac{0,23 \cdot (\alpha - 1)}{1 + \alpha \cdot m_B^0}, \left[\frac{\kappa Z_{J_2}}{\kappa Z_{топл}} \right] \quad (1.15)$$

5.2. Определение теоретически необходимого количества воздуха для сжигания топлива m_B^0

В состав углеводородного топлива входят водород, углерод, сера. Количество воздуха определяется на основании уравнений материального баланса процесса сжигания отдельных компонентов топлива.

5.3. Определение потребного количества окислителя для полного сжигания топлива

Расчет ведут обычно на 1 кг рабочей массы сжигаемого топлива. Основой для расчета служат стехиометрические уравнения реакции горения. Рассмотрим стехиометрические реакции окисления горючих веществ, входящих в состав горючего. Окисление водорода рабочей массы топлива:



Из этого уравнения следует, что каждый килограмм сжигаемого водорода требует 8 кг кислорода, при этом образуется 9 кг воды. Если в рабочей массе сжигаемого топлива содержится H_p % водорода, то для окисления водорода, входящего в 1 кг такого топлива, необходимо иметь массу кислорода (в кг), равную

$$\frac{32}{4} = \frac{H_p}{100} \quad (1.18)$$

Аналогично можно определить потребное количество кислорода для окисления остальных компонентов топлива. Результаты приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Значения расходов окислителя и теплоты сгорания для компонентов топлив

Элемент топлива, топливо	Количество кислорода, необходимого для сжигания компонента $1 \text{ кг } O_2 / m_{\text{возд}}^0$	Количество воздуха, необходимого для сжигания компонента 1 кг компонента	Теплота сгорания МДж/кг
--------------------------------	--	---	-------------------------------

H	8,0	34,8	125,6
S	1,0	4,35	10,9
C	2,67	11,6	39,3

Теплоемкости c_{pi} находятся по формуле Майера с учетом температурной зависимости изохорной теплоемкости c_{vi} (уравнения выбираются из таблицы П 1.2):

$$c_{pi} = c_{vi} + R_{\mu i}$$

В этом уравнении от температуры зависит теплоемкость при постоянном объеме. Ее зависимость от температуры определяется по таблице П.1.2 .

Например, при $T = T_z$ из таблицы П.1.2 имеем

$$c_{v \text{ CO}_2} = 0,775 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}} ; \quad R_{\mu \text{ CO}_2} = 0,189 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} .$$

В соответствии с формулой Майера

$$c_p = c_v + R_{\mu} = 0,775 + 0,189 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}} = 0,964 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{пр.сг.}} .$$

В качестве температуры используется ее абсолютное значение $T_z = t + 273$.

Находим формулу теплоты продуктов сгорания, подставив найденные значения в формулу в п.5.

Для определения максимальной теоретической температуры горения используем уравнение теплового баланса (см. п.1), из которого находим T_z .

Коэффициент полноты сгорания топлива зависит от коэффициента избытка воздуха. Для газовых топлив можно принять эту зависимость следующего вида:

$$\ln(1 - \zeta) = -b \cdot \alpha .$$

После потенцирования получаем:

$$\zeta = 1 - e^{-b \cdot \alpha} .$$

Коэффициент b можно принять равным 2,496. Зависимость работает в диапазоне изменений коэффициента избытка топлива в пределах: $1,1 \leq \alpha \leq 1,6$.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите материальный баланс рабочей, сухой и горючей массы топлива.
2. Что называется теплотой сгорания топлива? Чем отличаются высшая и низшая теплоты сгорания топлива?
3. Как определяются теоретически необходимое количество воздуха и состав продуктов сгорания?
4. Что называется коэффициентом избытка воздуха, от чего зависит его выбор?
5. Назовите основные стадии горения топлива.
6. Запишите уравнение теплового баланса устройства для сжигания топлива в топке.
7. Что понимается под термином «газовая смесь», каковы основные способы задания ее состава?
8. Что такое «средняя» (или кажущаяся) молекулярная масса смеси?
9. Что такое парциальное давление компонента в смеси? Определите парциальное давление одного из компонентов.
10. Как определяется газовая постоянная смеси и каков ее физический смысл?
11. Приведите уравнение Клайперона – Менделеева (уравнение состояния) для m кг газа.
12. Как связаны между собой изобарная и изохорная теплоемкости?
13. Как определяется теплоемкость газовой смеси?
14. Как определяется теплота при использовании средних теплоемкостей?
15. Что называется парциальным (приведенным) объемом компонента смеси, как он определяется?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ЦИКЛЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение термодинамических процессов с газообразным рабочим телом.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Изучения адиабатного и политропного процесса.
- 2.2. Определения основных параметров состояния системы.
- 2.3. Определения количества подведенного тепла и совершенной работы.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Одной из задач теплотехники заключается в проектировании различных тепловых машин. Этот вид техники представлен машинами, предназначенными для преобразования тепловой энергии в различные другие формы энергии. В первую очередь это трансформация теплоты в механическую энергию (эти машины служат для совершения работы). К этой категории машин относятся паровые машины и турбины, двигатели внутреннего сгорания и другие. Вторая категория машин предназначена для превращения механической энергии (механической работы) в различные виды энергии рабочего тела (энергия давления, кинетическая энергия и др.). К этой категории машин относятся компрессоры различной конструкции (поршневые, центробежные и др.).

В качестве примера рассмотрим работу поршневого компрессора. В любой тепловой машине реализуется использование определенного цикла. Поршневой компрессора машина циклического действия. Циклом называется процесс, в котором начальное и конечное состояния системы совпадают. Различают: обратимый и необратимый циклы. Инфинитизимальные и квазистатические процессы обратимы.

Цикл представляет собой последовательное чередование элементарных термодинамических процессов. В тепловых процессах рабочим телом является газ, т.к. это физическое тело обладает способностью изменять свои параметры

при изменении давления и температуры. Используя газ в тепловых машинах, человек обрел возможность превращать тепловую энергию в механическую (совершать работу) и заменить ручной труд машинным. Появилась необходимость количественно оценивать преобразование энергии в различных рабочих циклах, используемых в тепловых машинах. Для осуществления количественной оценки используются уравнение состояния идеального газа и закона политропического сжатия. Эти два уравнения позволяют определять параметры состояния рабочего тела (температуру, давление и удельный объем). Знание параметров в начале и конце процесса позволяет определить затраты энергии на осуществление процесса. В таблице приведены уравнения, позволяющие оценивать соотношения между параметрами рабочего тела при переходе из одного состояния в другое и расчета количества энергии потребного для осуществления процесса.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Баллон со сжатым газом оставлен на открытой площадке. Определить, насколько возрастет давление газа в баллоне, если температура в дневное летнее время достигает значения. Определить, как изменится энергия находящегося в баллоне газа (исходные данные в табл. 2.1).

Для всех студентов группы произвести расчеты по предложенным ниже вопросам. Процессы совершаются над газом по варианту первой задачи задания.

Определить затраты энергии на сжатие газа, если теплообмен компрессора с окружающей средой исключен.

Определить затраты энергии на сжатие в компрессоре, если в нем поддерживается постоянная температура.

Определить затраты энергии на сжатие газа, если возможен теплообмен с окружающей средой.

Таблица 2.1

Исходные данные

		температура	⁰ С	давление	показатель
п/п	газ	начальная	на солнце	начальное, бар	адиабаты, при 1 ата
1	кислород	20	70	200	1,40
2	кислород	23	65	175	
3	кислород	25	60	150	
4	пропан	30	65	40	1,16
5	пропан	35	70	35	
6	пропан	30	50	30	
7	метан	25	70	25	1,32
8	метан	20	65	20	
9	метан	25	60	36	
10	бутан	20	55	40	1,10
11	бутан	20	50	35	
12	бутан	20	45	20	
13	этан	25	70	30	1,20
14	этан	30	65	25	
15	этан	23	60	20	
16	азот	20	70	15	1,40
17	азот	22	65	20	
18	азот	25	60	60	
19	аргон	20	55	50	1,68
20	аргон	23	60	60	
21	аргон	24	65	70	
22	гелий	2-	60	80	1,66
23	гелий	21	55	70	
24	гелий	22	50	60	

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Ориентируясь на условия задания, необходимо определить, к какой категории процессов относится предложенный заданием процесс.

2. По соотношениям, представленным в таблице 2.2, для определения работы сжатия необходимо выбрать выражения (уравнения) необходимые для расчета.

3. Произвести необходимые расчеты.

4. Изобразить процесс в диаграмме p - v .

5. Проанализировать результаты.

Варианты заданий в таблице приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2

Сводная таблица частных случаев политропного процесса

Процесс	n	Соотношения параметров	Δu	Δh	Δs	q_t	l
Изохорный $V = const$	$\pm \infty$	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	$c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	0
Изобарный $P = const$	0	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_p \cdot \Delta T$	$p \cdot (v_2 - v_1)$
Изотермический $T = const$	1	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	0	0	$R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$
Адиабатный $dq_t = 0$	k	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$	0	0	$c_v \cdot \Delta T$
Политропный процесс $dq_t \neq 0$	n	$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \cdot \Delta T$	$c_p \cdot \Delta T$			$l_{1-2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]$

							$c_v \cdot \Delta T$
--	--	--	--	--	--	--	----------------------

Таблица 2.3

Исходные данные

		температура, °C	давление, бар		показатель адиабаты при 1 апа
п/п	газ	начальная	начальное	конечное	
1	кислород	20	2,0	6,0	1,40
2	кислород	23	1,7	6,4	
3	кислород	25	1,5	5,1	
4	пропан	30	1,4	4,2	1,16
5	пропан	35	1,3	4,0	
6	пропан	30	1,3	4,5	
7	метан	25	1,2	5,0	1,32
8	метан	20	1,2	4,0	
9	метан	25	1,3	4,5	
10	бутан	20	1,4	6,1	1,10
11	бутан	20	1,3	5,5	
12	бутан	20	1,2	4,1	
13	этан	25	1,3	3,9	1,20
14	этан	30	1,2	4,8	
15	этан	23	1,2	3,6	
16	азот	20	1,5	6,2	1,40
17	азот	22	1,2	5,2	
18	азот	25	1,6	4,8	
19	аргон	20	1,5	4,5	1,68
20	аргон	23	1,6	4,4	
21	аргон	24	1,7	5,2	
22	гелий	2-	1,8	4,4	

23	гелий	21	1,7	6,3	1,66
24	гелий	22	1,6	7,2	

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите параметры состояния рабочего тела и единицы их измерения
2. Изобразите основные термодинамические процессы в координатах $p-v$ и $T-s$.
3. Как связаны между собой параметры состояния в изохорном, изобарном, адиабатном и политропном процессах?
4. На основе первого закона термодинамики проанализируйте распределение энергии в основных термодинамических процессах.
5. Каковы важнейшие свойства координатных систем $T-s$ и $p-v$?
6. Из чего складывается внутренняя энергия идеального и реального газов? Приведите дифференциальное уравнение изменения внутренней энергии реального газа.
7. Как подсчитать изменение внутренней энергии идеального и реального газов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ТРУБЫ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Познакомиться с одним из методов экспериментального определения коэффициента теплоотдачи.
- 1.2. Приобрести навыки обработки результатов экспериментов с применением методов теории подобия.
- 1.3. На основе исследования теплоотдачи при поперечном обтекании трубы потоком воздуха научиться использовать методы теории подобия и основные положения теории конвективного теплообмена для анализа конкретных случаев теплоотдачи.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Экспериментальное определение значений среднего коэффициента теплоотдачи от поверхности цилиндра в поток воздуха при различных скоростях течения последнего.
- 2.2. Обоснование и выбор уравнения подобия.
- 2.3. Нахождение на основе полученных экспериментальных данных коэффициентов этого уравнения.
- 2.4. Анализ результатов и сопоставление найденного уравнения подобия с уже известными уравнениями подобия (для той же области изменения определяющих чисел подобия).

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Основным элементом установки (рис. 3.1) является стальная цилиндрическая труба **10** со встроенным электронагревателем, установленная горизонтально в средней части камеры **3** из органического стекла. Форма и размеры камеры обеспечивают практически равномерное поле скоростей в набегающем на трубу воздушном потоке.

Для определения средней температуры поверхности трубы в нее вмонтированы шесть термопар **9**. Значения измеряемых ими температур $t_{ст}$ фиксируются на шкале автоматического потенциометра **2**. Температуры воздуха на входе в камеру $t_{жс\ вх}$ и на выходе из нее $t_{жс\ вых}$ измеряются ртутными термометрами **4** и **1**.

Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется автотрансформатором **11** и измеряется ваттметром **12**.

Поток воздуха в камере создается центробежным вентилятором **8**, приводимым в действие электродвигателем постоянного тока **15**. Электродвигатель питается от сети переменного тока через автотрансформатор **13** и выпрямитель **14**. Меняя напряжение с помощью автотрансформатора, можно изменять частоту вращения вентилятора и, тем самым, регулировать подачу воздуха в камеру.

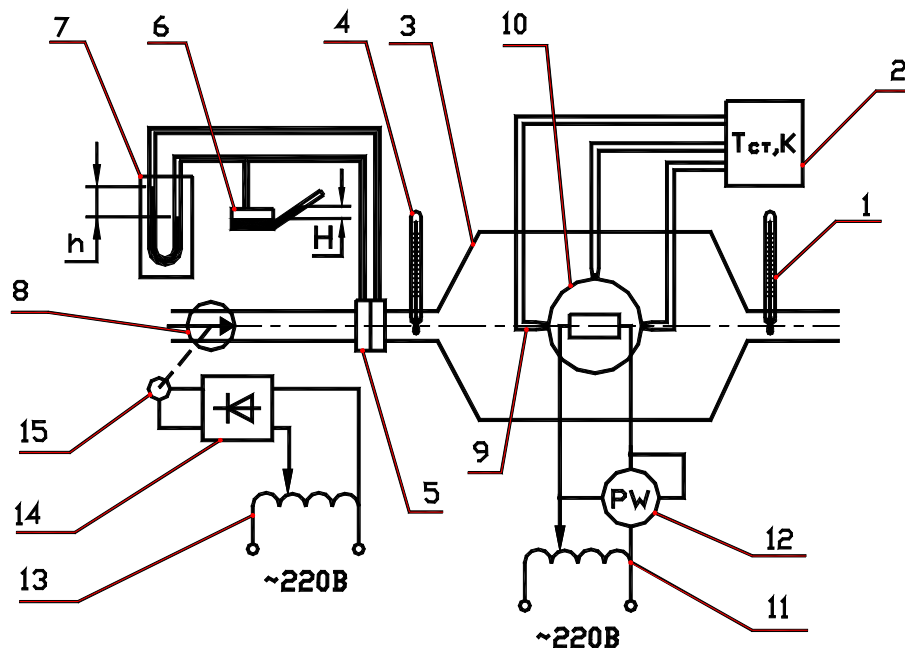


Рис. 3.1

Для измерения расхода воздуха применяется диафрагма **5**, установленная в трубопроводе, соединяющем вентилятор **8** и камеру **3**. Перепад давлений h на диафрагме измеряется дифференциальным манометром **7**, а давление H перед диафрагмой **5** наклонным микроманометром **6**.

Атмосферное давление $p_{ат.м}$ определяется по барометру, установленному в лаборатории.

При проведении лабораторной работы необходимо выполнять следующие правила техники безопасности:

- 1) Включение опытной установки в сеть и отключение ее от сети производить только с разрешения преподавателя;
- 2) Немедленно отключить электропитание установки в случаях ощущения действия электрического напряжения на корпусе приборов, дымления питающих трансформаторов, дымления или самопроизвольного снижения оборотов электродвигателя вентилятора;
- 3) Запрещается оставлять работающую установку без присмотра, отсоединять проводники от приборов установки, самостоятельно устранять неисправности электропроводки;
- 4) При обнаружении каких-либо неисправностей в установке, необходимо немедленно прекратить работу на установке и поставить в известность преподавателя.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 Методика проведения эксперимента

- 4.1.1. Изучить правила техники безопасности при работе на данной лабораторной установке.
- 4.1.2. Включить в сеть автотрансформатор и установить с его помощью необходимую мощность нагревателя (значение мощности задается преподавателем).
- 4.1.3. Через десять минут после включения нагревателя включить в сеть автотрансформатор **13** и установить с его помощью обороты электродвигателя, при которых $H = 20$ мм.вод.ст.
- 4.1.4. Включить в сеть потенциометр **2**.

4.1.5. При достижении установившегося теплового режима (этому соответствуют постоянные во времени температуры поверхности цилиндра и воздуха) произвести замеры величин, указанных в таблице 5.1.

4.1.6. После окончания измерений на первом режиме с помощью автотрансформатора **13** установить обороты вентилятора, соответствующие $H = 40$ мм.вод.ст. После того как процесс теплоотдачи выйдет на стационарный режим, выполнить, как это было указано в пункте 4.1.5., замеры всех необходимых величин.

Аналогичным образом провести последующие три опыта при $H = 60, 80, 100$ мм.вод.ст. Для сохранения в каждом опыте условия стационарности теплового режима, интервал между опытами должен быть не менее 10 мин. Мощность нагревателя в опытах остается неизменной. Все результаты измерений заносятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

№	В	Н	h	$t_{\text{вх}}$	$t_{\text{вых}}$	t_{w1}	t_{w2}	t_{w3}	t_{w4}	t_{w5}	t_{w6}
	мм.рт.ст	мм.вд.ст	мм.вд.ст	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$

4.2. Обработка экспериментальных данных

4.2.1. Средняя температура поверхности трубы

$$t_c^{cp} = \frac{\left(\sum_{i=1}^j t_i \right)}{j} \quad ^{\circ}\text{C}, \quad (3.1)$$

где j – количество термопар на трубе.

4.2.2. Средняя температура воздуха в камере

$$t_{\text{жс}}^{cp} = \frac{(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})}{2} \quad ^{\circ}\text{C}. \quad (3.2)$$

4.2.3. Разность температур воздуха и поверхности трубы (температурный напор)

$$\Delta t = t_c^{cp} - t_{жс}^{cp} \quad ^\circ C . \quad (3.3)$$

4.2.4. Разность температур воздуха на входе и выходе (температурный перепад)

$$\Delta t_{жс} = t_{вых} - t_{вх} \quad ^\circ C . \quad (3.4)$$

4.2.5. Абсолютное давление воздуха перед диафрагмой

$$p = B \cdot 133.3 + H \cdot 9.81 \quad Па , \quad (3.5)$$

где B – барометрическое давление (мм.рт.ст.).

4.2.6. Плотность воздуха перед диафрагмой

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T_{вх}} \quad \frac{кг}{м^3} , \quad (3.6)$$

где $R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot K}$ – характеристическая газовая постоянная воздуха;

$T_{вх}$ – абсолютная температура воздуха на входе в камеру (К).

4.2.7. Массовый расход воздуха

$$m = 3.4 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho \Delta p} \quad \frac{кг}{с} , \quad (3.7)$$

где $\Delta p = h \cdot 9.81$ – перепад давлений на диафрагме (Па).

4.2.8. Плотность воздуха в камере

$$\rho_k = \frac{p}{R T_{жс}^{cp}} \quad \frac{кг}{м^3} , \quad (3.8)$$

где $T_{жс}^{cp}$ – абсолютная температура воздуха в камере (К).

4.2.9. Скорость воздуха у поверхности трубы

$$W = \frac{m}{F_k \rho_k} \quad м/с . \quad (3.9)$$

4.2.10. Тепловой поток от поверхности трубы к воздуху

$$Q_k = c_p m \Delta t_{жс} \quad Вт , \quad (4.3.10)$$

где $c_p = 1000$ теплоемкость воздуха ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$).

4.2.11. Боковая поверхность трубы

$$F_{\sigma} = \pi d l \quad \text{м}^2. \quad (3.11)$$

4.2.12. Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q_k}{\Delta t F_{\sigma}} \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (3.12)$$

4.2.13. Используя значения α и W , рассчитывается для каждого режима критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}; \quad (3.13)$$

критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu}. \quad (3.14)$$

4.2.14. Вычисляем натуральный логарифм числа Нуссельта $\ln Nu$.

4.2.15. Вычисляем натуральный логарифм числа Рейнольдса $\ln Re$.

Необходимые для расчетов значения λ и ν воздуха выбираются из таблиц физических свойств воздуха (табл. 4.3) по температуре $t_{ж}$; диаметр трубы $d_{тр} = 0,051$ м (определяющий линейный размер). Полученные значения чисел Nu и Re заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 3.2

№	t_c^{cp}	$t_{ж}^{cp}$	$\Delta t_{ж}$	Δt	ρ	m	W	Q_k	α	Nu	Re	$\ln Nu$	$\ln Re$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	кг/м ³	кг/с	м/с	Вт	Вт/м ² К	---	---	---	---

Таблица 3.3

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50
$\lambda \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$	2,44 2	2,512	2,593	2,675	2,756	2,826
$\nu \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	13,2 8	14,16	15,06	16,00	16,96	17,95

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 5.1. Отчет оформляется на листах формата А4 в соответствии с ГОСТ. Образец оформления работы представлен в методическом уголке лаборатории теплотехники.
- 5.2. Отчет должен содержать:
1. Цель работы.
 2. Схему установки.
 3. Опытные данные (табл. 3.1).
 4. Обоснование вида уравнения подобия.
 5. Расчетные формулы и результаты обработки опытных данных (табл. 5.2).
 6. График зависимости $\alpha = f(w)$.
 7. Расчет постоянных уравнения подобия.
 8. Запись полученного уравнения подобия.
- 5.3. Расчеты необходимо выполнять в системе СИ.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определение конвективного теплообмена.
2. Уравнение Ньютона – Рихмана применительно к конвективному теплообмену. В чем состоит трудность расчета процесса теплоотдачи по уравнению Ньютона – Рихмана?
3. Физический смысл коэффициента теплоотдачи и его размерность. От каких факторов зависит?

4. Каков механизм конвективного теплообмена при ламинарном и турбулентном режиме течения жидкости. При каком режиме течения интенсивность теплообмена выше и почему?
5. Система каких дифференциальных уравнений дает математическое описание конвективного переноса тепла при движении жидкости (газа)?
6. Назовите краевые условия (условия однозначности), которые применяются при решении задач конвективного теплообмена.
7. Каковы условия подобия физических явлений?
8. Первая и вторая теоремы подобия.
9. Третья теорема подобия. Критерии определяющие и неопределяющие.
10. Критериальные уравнения в общем виде. Критериальное уравнение конвективного теплообмена и его частные случаи.
11. Физический смысл критериев гидромеханического и теплового подобия.
12. Изложите методику решения задач конвективного теплообмена на основе теории подобия.
13. Что такое определяющий линейный размер и определяющая температура?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

СТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Получить практические навыки определения коэффициента теплопроводности методом неограниченного цилиндрического слоя (метод трубы).
- 1.2. Закрепить знание основ теории теплопроводности.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Провести экспериментальное определение коэффициента теплопроводности вещества методом неограниченного цилиндрического слоя.
- 2.2. Произвести необходимые расчеты и построить график изменения температур по толщине цилиндрической стенки.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для определения коэффициента теплопроводности (рис. 4.1) состоит из асбоцементной трубы 1, закрытой с торцов заглушками 2 для исключения потоков теплоты в осевом направлении. Внутри трубы вмонтирован электрический нагреватель 3.

Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности методом трубы

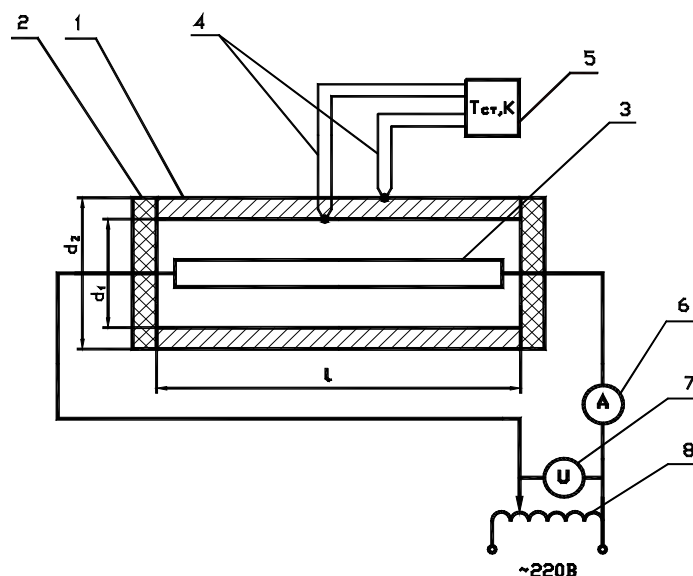


Рис. 4.1

Мощность, потребляемая нагревателем, фиксируется по показаниям амперметра 6 и вольтметра 7. Выделяемое нагревателем тепло отдается в окружающую среду через стенки трубы в радиальном направлении.

Температура внутренней и наружной поверхности трубы измеряется с помощью хромель-копелевых термопар 4 и потенциометра 5. Потребляемая нагревателем мощность изменяется с помощью лабораторного автотрансформатора 8.

4. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

- 4.1. К работе допускаются только студенты, прошедшие общий инструктаж по технике безопасности в лаборатории теплотехники.
- 4.2. Во время экспериментов следить за тем, чтобы параметры электрической нагрузки (напряжение и сила тока) не превышали предельных значений, указанных на пультах установок или преподавателем.
- 4.3. Не оставлять без присмотра установки, находящиеся под напряжением.

4.4. При появлении пробоев изоляции, запаха гари и т.п. немедленно прекратить работу на установке и пригласить для принятия мер преподавателя или дежурного лаборанта.

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Методика проведения эксперимента

5.1.1. Включается в сеть автотрансформатор 6 (рис. 4.1) и на нагревательном элементе 3 устанавливается величина силы тока I (по указанию преподавателя или лаборанта).

5.1.2. При достижении установившегося теплового режима фиксируются значения величин: силы тока I , напряжения U , показания термопар t_{c1} , t_{c2} . Данные измерений заносятся в табл. 4.1.

Таблица 4.1

I	U	Q	t_{c1}	t_{c2}	\square	t_I	t_{II}
A	B	Вт	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{Bm}{m \cdot K}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$

5.2. Обработка результатов

5.2.1. Определяется мощность нагревательного элемента

$$Q = I \cdot U \quad [Bm]. \quad (4.1)$$

5.2.2. Определяется значение коэффициента теплопроводности материала трубы

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi \cdot l \cdot (t_{c1} - t_{c2})}. \quad (4.2)$$

5.2.3. Используя полученные значения Q , λ , t_{c1} , t_{c2} , рассчитывают температуры t_I и t_{II} изотермических поверхностей, имеющих радиусы r_I и r_{II} (задаются преподавателем)

$$t_I = t_{c1} - \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_I}{r_1}, \quad (4.3)$$

$$t_{II} = t_{c1} - \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_{II}}{r_1}. \quad (4.4)$$

5.2.5. Строится график изменения температуры по толщине стенки
 $t = f(r)$.

5.2.5. Результаты вычислений заносятся в таблицу 6.1.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Отчет оформляется на листах формата А4 в соответствии с ГОСТ. Образец оформления работы представлен в методическом уголке лаборатории теплотехники.
- 6.2. Отчет должен содержать:
 1. Цель работы.
 2. Схему установки.
 3. Опытные данные (табл. 6.1).
 4. Расчетные формулы и результаты обработки опытных данных (табл. 4.1).
 5. График зависимости $t = f(r)$.
- 6.3. Расчеты необходимо выполнять в системе СИ.
- 6.4. Работа должна быть сброшюрована.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова физическая картина передачи тепла путем теплопроводности для твердых, жидких и газообразных веществ?
2. Температурное поле. Установившиеся и неуставившиеся тепловые режимы.
3. Что понимается под изотермической поверхностью, температурным градиентом и тепловым потоком?
4. Запишите уравнение закона Фурье и проанализируйте его.

5. Сформулируйте понятие «коэффициент теплопроводности», укажите его размерность в системе СИ. Сравнительная оценка коэффициентов теплопроводности различных материалов. Как зависит коэффициент теплопроводности от пористости вещества?
6. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? Зависимость коэффициента теплопроводности от физических характеристик материалов. Какие материалы называют теплоизоляционными?
7. Чем отличается стационарная теплопроводность от нестационарной?
8. Охарактеризуйте сущность метода определения λ , используемого в лабораторной работе.
9. Укажите закономерность изменения температуры по толщине цилиндрической стенки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ
ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Изучить экспериментальным методом зависимость расхода воздуха от перепада давлений при истечении через суживающееся сопло.
- 1.2. На основе анализа полученных данных познакомиться с явлением кризиса течения и определить значение критического отношения давлений.
- 1.3. Познакомиться с методом определения коэффициента расхода сопла.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Проведение экспериментального исследования зависимости расхода воздуха от перепада давлений при истечении через суживающееся сопло.

$$dq = du + d(pv) + \frac{dW^2}{2} = dh + \frac{dW^2}{2}$$

- 2.2. Обработка и анализ полученных данных. Определение критического отношения давлений.
- 2.3. Определение коэффициента расхода сопла при различных перепадах давлений.
- 2.4. Определение скорости истечения при исследуемых значениях перепада давлений.
- 2.5. Оформление отчета.

3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

- 3.1. Для исследования газовых потоков используются теоретические и экспериментальные методы. Теоретические исследования базируются на

$$dh + \frac{dW^2}{2} = 0$$

$$h + \frac{W^2}{2} = const$$

анализе аналитических выражений объективных законов природы, описывающих рассматриваемое явление. К таким законам относятся закон сохранения энергии, закон сохранения количества движения (импульса) и закон сохранения массы.

При решении многих практических задач перемещения газов по каналам потоки считаются одномерными, т.е. рассматривается изменение их параметров только вдоль потока.

В этом случае уравнения сохранения записываются следующим образом.

3.1.1. Уравнение закона сохранения энергии, или уравнение первого закона термодинамики для потока в дифференциальной форме, имеет вид:

$$dq = du + d(pv) + \frac{dW^2}{2} + g dz + dl_{mex} + dl_{mp}$$

(5.1)

$$- dp = \frac{\rho dW^2}{2}$$

где dq – теплота, подводимая или отводимая от потока через стенки канала;

du – изменение внутренней энергии потока;

$d(pv)$ – работа проталкивания (изменение потенциальной энергии потока в поле сил давления);

$dW^2 / 2$ – изменение кинетической энергии потока;

$g dz$ – изменение потенциальной энергии потока в поле гравитационных сил;

dl_{mex} – техническая работа;

dl_{mp} – работа против сил трения;

v – удельный объем.

При течении идеального газа по горизонтальному каналу без совершения технической работы уравнение (3.1) принимает вид:

$$dq = du + d(pv) + \frac{dW^2}{2} = dh + \frac{dW^2}{2} \quad (5.2)$$

где $dh = du + d(pv)$ – изменение энтальпии потока.

Для адиабатного течения ($dq = 0$) можно записать:

$$dh + \frac{dW^2}{2} = 0, \quad (5.3)$$

т.е. для всех сечений потока выполняется условие:

$$h + \frac{W^2}{2} = \text{const} \quad (5.4)$$

Отсюда следует, что уменьшение или увеличение кинетической энергии потока происходит за счет соответствующего изменения его энтальпии.

3.1.2. Уравнение движения для одномерного стационарного потока газа, в котором отсутствуют силы трения, в соответствии со вторым законом Ньютона может быть записано в виде:

$$-dp = \frac{\rho dW^2}{2}, \quad (5.5)$$

где ρ – плотность газа.

С учетом соотношения $\rho = 1/v$ уравнению (3.5) можно придать иную форму записи:

$$-vdp = \frac{dW^2}{2} \quad (5.6)$$

Равенство (3.6) для адиабатного течения может быть также получено из уравнения (3.2). В этом случае $du = -dl = -pdv$, и тогда:

$$-p dv + d(pv) + \frac{dW^2}{2} = 0 \quad \text{или} \quad -v dp = W dW \quad (5.7)$$

Из (3.6) и (3.7) следует, что изменения давления и скорости вдоль потока имеют противоположные знаки: если давление по потоку падает, то скорость возрастает и, наоборот, если в направлении потока скорость уменьшается, то давление увеличивается. Каналы, в которых $dp < 0$ и $dW > 0$, являются соплами (конфузоры), а в которых $dp > 0$ и $dW < 0$ – диффузорами.

3.1.3. Уравнение неразрывности для одномерного стационарного потока имеет вид:

$$m = WF\rho \quad (5.8)$$

где m – массовый расход газа [кг/с];

F – площадь поперечного сечения канала [м²].

3.1.4. В случае течения идеального газа система уравнений дополняется уравнением:

$$pv = RT \quad (5.9)$$

где R – характеристическая газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг⁰К), а также уравнением термодинамического процесса. В частности, для адиабатного процесса:

$$pv^k = \text{const} \quad (5.10)$$

или в дифференциальной форме:

$$\frac{dp}{p} + k \cdot \frac{dv}{v} = 0 \quad (5.11)$$

3.2. Формулы (3.6), (3.8) и (3.11) позволяют получить соотношение, связывающее геометрию канала и изменение скорости в нем:

$$\frac{dF}{F} = (M^2 - 1) \cdot \frac{dW}{W} \quad (5.12)$$

где M – число Маха, равное отношению скорости потока к скорости звука ($M = W/a$). Соотношение (5.12) называют законом геометрического обращения воздействия.

Из уравнения (5.12) для суживающегося канала ($dF < 0$) и дозвукового течения ($M < 1$) получается $dW > 0$. То есть в суживающемся канале дозвуковой поток ускоряется и, следовательно, такой канал является дозвуковым соплом.

Для сверхзвукового потока ($M > 1$) этот же канал является диффузором, так как при $dF < 0$ и $M > 1$ - $dW < 0$.

Из закона геометрического обращения воздействия вытекает, что для ускорения потока до сверхзвуковых скоростей сопло должно состоять из последовательно соединенных суживающейся и расширяющейся частей (сопло Лаваля).

3.3. Теоретическое значение скорости при истечении газа через сопло можно

$$W_{кр} = \sqrt{2k \cdot \frac{RT_1}{k+1}}$$

найти, интегрируя уравнение (3.7):

Если газ поступает в сопло из ресивера, то скорость потока на входе в канал сопла можно принять равной нулю, и на выходе скорость будет равна:

$$W = \sqrt{2kRT_1 \cdot \frac{1 - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{k-1}} \quad (5.13)$$

где T_1 – абсолютная температура газа перед соплом;

$\beta = p_2 / p_1$ – отношение давлений за соплом и перед ним.

Формула массового расхода газа находится в результате совместного решения (5.8) и (5.13), при этом $F = F_{вых}$ ($F_{вых}$ – выходное сечение сопла):

$$m = F_{вых} p_1 \cdot \sqrt{2k \cdot \frac{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{RT_1 \cdot (k-1)}} \quad (5.14)$$

Функция (3.14) имеет максимум при:

$$\beta = \beta_{кр} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.15)$$

где $\beta_{кр} = p_{2кр} / p_1$ – критическое отношение давлений.

Подстановка $\beta = \beta_{кр}$ в уравнения (5.13) и (5.14), приводит к следующим соотношениям:

$$W_{кр} = \sqrt{2k \frac{RT_1}{k+1}} = \sqrt{kRT_{2кр}} = a \quad (5.16)$$

$$m_{кр} = m_{\max} = F_{вых} \cdot p_1 \cdot \sqrt{k \cdot \frac{\left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}}{RT_1}} \quad (5.17)$$

где $W_{кр}$ – критическая скорость истечения;

$m_{кр}$ – критический (максимальный) расход газа.

Следует обратить внимание на то, что критическая скорость потока $W_{кр}$ равна скорости звука при параметрах газа в выходном сечении сопла, соответствующих $\beta_{кр}$;

$$p_{2кр} = p_1 \beta_{кр}$$

$$T_{2кр} = T_1 \cdot \beta_{кр}^{1-\frac{1}{k}}$$

Действительно:

$$W_{кр} = \sqrt{2k \cdot \frac{RT_1}{k+1}} = \sqrt{kRT_{2кр}} = a \quad (5.18)$$

Критическая скорость $W_{кр}$ есть та наибольшая скорость, которая может быть получена на выходе из суживающегося сопла. В области значений $\beta \leq \beta_{кр}$ уменьшение β не приводит к дальнейшему увеличению скорости истечения, т.к. с момента достижения $\beta_{кр}$ давление в выходном сечении сопла становится равным $p_{2кр}$ и перестает зависеть от давления p_2 .

Для понимания причины этого явления необходимо усвоить, что изменение давления распространяется в сплошной среде со скоростью звука. Пока газ движется со скоростью $W < W_{кр}$, изменение давления p_2 (при

неизменном давлении p_1) передается по потоку внутрь сопла, т.к. скорость потока меньше скорости звука. Давление в выходном сечении сопла равно p_2 .

При $\beta \leq \beta_{кр}$ скорости потока ($W_{кр}$) и распространения давления ($акр$) в выходном сечении сопла оказываются равными по величине, а относительная скорость распространения изменения давления ($акр - W_{кр}$) становится равной нулю. В результате изменение p_2 уже не может распространиться к выходному сечению сопла и там давление перестает меняться, сохраняясь все время равным $p_{2кр}$.

Наличие трения в реальных процессах истечения приводит к тому, что действительное значение скорости оказывается ниже теоретического:

$$W_o = \varphi W = \varphi \cdot \sqrt{2kRT_1 \cdot \frac{1 - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{k-1}} \quad (5.19)$$

где φ – коэффициент скорости.

При определении действительного значения расхода приходится учитывать не только уменьшение скорости истечения, но и сжатие струи на выходе из канала. Действительный расход определяется по формуле:

$$m_o = \mu m = \mu F_{вых} p_1 \cdot \sqrt{2k \cdot \frac{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{RT_1 \cdot (k-1)}} \quad (5.20)$$

где μ – коэффициент расхода.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из соплового устройства 6 (рис. 5.1), вакуумного насоса 1 с электроприводом 2, регулировочного вентиля 3, соединительных трубопроводов 5.

Для измерения расхода воздуха через установку используется ротаметр 7. Давление воздуха за соплом p_2 определяется с помощью вакуумметра 4, а перед соплом p_1 с помощью вакуумметра 8. Параметры окружающей среды измеряются барометром 9 и термометром 10.

Вакуумный насос 1 создает необходимый для течения воздуха через сопло перепад давлений. Величина этого перепада регулируется вентилем 3. При полностью закрытом вентиле 3 давления перед соплом p_1 и за ним p_2 одинаковы и равны атмосферному; течение воздуха в канале сопла отсутствует. По мере открытия вентиля давление p_2 за соплом уменьшается, а перепад давлений $\Delta p = p_1 - p_2$, соответственно, растет. Температура воздуха перед соплом принимается равной температуре воздуха в лаборатории.

При проведении данной лабораторной работы необходимо выполнять следующие правила техники безопасности:

- 1) включать установку только с разрешения преподавателя или лаборанта, предварительно убедившись в исправности соединительных проводов и ограждения вакуумного насоса;
- 2) не оставлять работающую установку без присмотра;
- 3) в случае появления не характерного для установки механического шума, дымления или запаха горелой изоляции немедленно прекратить выполнение работы, обесточить установку и поставить в известность преподавателя или лаборанта;
- 4) запрещается в процессе работы закрывать отверстия ротаметра рукой или какими-либо предметами;
- 5) после окончания работы необходимо выключить установку и привести в порядок рабочее место.

Схема лабораторной установки

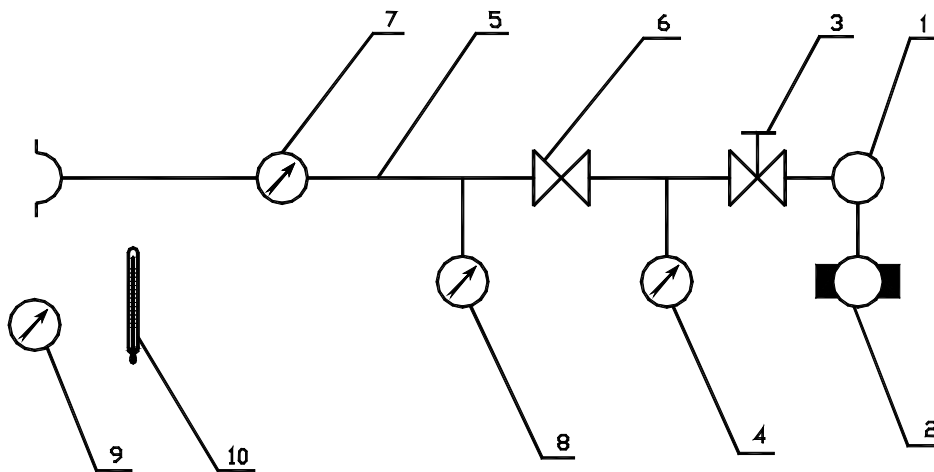


Рис. 5.1

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. Порядок выполнения работы

Определить с помощью находящихся в лаборатории барометра и термометра атмосферное давление B и температуру окружающего воздуха t_o . Значения B и t_o занести в таблицу 5.1.

Включить вакуумный насос и с помощью регулировочного вентиля установить по вакуумметру разрежение за соплом $p_{2\text{вак}}$, величина которого

$$m_o = n \cdot k_{pm} \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

задается преподавателем.

По верхнему обрезу поплавка ротаметра измерить в делениях шкалы величину расхода воздуха.

Произвести аналогичные измерения расхода, последовательно увеличивая разрежение за соплом. Шаг изменения $p_{2\text{вак}}$ и общее число значений $p_{2\text{вак}}$, при которых производятся измерения, указываются преподавателем.

Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

5.2. Методика обработки результатов

5.2.1. Для всех опытных точек рассчитываются абсолютные давления перед соплом p_1 , за соплом p_2 , действительный массовый расход воздуха m_d , отношение абсолютных давлений β , теоретические значения массового расхода m_T и скорости W . Полученные значения заносятся в таблицу 5.1.

5.2.1.1. Атмосферное давление:

$$p_o = B \cdot 133.3 \quad [Па] \quad (5.21)$$

где B – барометрическое давление в мм.рт.ст.

5.2.1.2. Абсолютное давление перед соплом определяется как разность показаний барометра и вакуумметра (8):

$$p_1 = p_o - 9.81 \cdot p_1^{вак} \quad [Па] \quad (5.22)$$

5.2.1.3. Абсолютное давление за соплом определяется по формуле:

$$p_2 = p_o \left(1 - \frac{p_2^{вак}}{100} \right) \quad [Па] \quad (5.23)$$

5.2.1.4. Действительный массовый расход воздуха определяется по показаниям ротаметра:

$$m_d = n \cdot k_{pm} \quad \left[\frac{кг}{с} \right] \quad (5.24)$$

где n – показания ротаметра в делениях его шкалы;

k_{pm} – калибровочный коэффициент ротаметра.

Значение k_{pm} указывается на лабораторной установке.

5.2.1.5. Отношение абсолютных давлений за соплом и перед ним вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} \quad (5.25)$$

5.2.1.6. Теоретический расход воздуха рассчитывается по формуле:

$$m_T = 0.25\pi d^2 p_1 \cdot \sqrt{2k \cdot \frac{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{RT_1 \cdot (k-1)}} \left[\frac{\kappa Z}{c} \right] \quad (5.26)$$

где k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$);

d – диаметр выходного сечения сопла (указан на установке).

$$T_l = 273 + t_0, K$$

5.2.1.7. Коэффициент расхода, представляющий собой отношение действительного расхода к теоретическому:

$$\mu = \frac{m_\partial}{m_T} \quad (5.27)$$

5.2.1.8. Теоретическое значение скорости потока на выходе из сопла:

$$W = \sqrt{2kRT_1 \cdot \frac{1 - \beta^{1+\frac{1}{k}}}{k-1}} \left[\frac{M}{c} \right] \quad (5.28)$$

5.2.2. Строится график зависимости $m_\partial = f(\beta)$. По этому графику определяется экспериментальное значение критического отношения давлений $\beta_{кр \text{ эксп}}$, которому соответствует абсцисса точки, начиная с которой действительный расход перестает изменяться.

5.2.3. По формуле (5.15) определяется теоретическое значение критического отношения давлений. Найденное значение сравнивается с экспериментальным.

5.2.4. На той же координатной сетке, на которой построена зависимость $m_\partial = f(\beta)$, строится график зависимости теоретического расхода $m_T = f(\beta)$. Проводится сравнительный анализ зависимостей теоретического и действительного расходов, на основе которого делается вывод о диапазоне изменения β , в котором применима формула (5.14).

Таблица 5.1

$$B = \text{мм.рт.ст.} \quad t_o = {}^{\circ}\text{C}$$

№	$p_1^{\text{вак}}$	$p_2^{\text{вак}}$	n	p_1	p_2	\square	m_o	m_T	\square	W
	мм.во д.ст	%	де л	Па	Па	----	кг/ с	кг/ с	----	м/с

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Отчет оформляется на листах формата А4 в соответствии с образцами работ, приведенными на стенде кафедры.
- 6.2. Отчет должен содержать:
- 1) цель работы;
 - 2) схему установки;
 - 3) таблицу 5.1;
 - 4) пример расчета одной строки таблицы 5.1;
 - 5) графики зависимостей $m_T = f(\beta)$ и $m_o = f(\beta)$;
 - 6) экспериментальное значение критического отношения давлений $\beta_{кр}$ _{эксп} и расчет его теоретического значения;
 - 7) вывод о границах применимости формул (5.14) и (5.13).
- 6.3. Расчет необходимо выполнять в системе СИ. Написание символов в формулах, а также обозначение размерностей величин должно соответствовать ЕСКД.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой системой уравнений пользуются для теоретического анализа газовых потоков?
2. Как записывается уравнение первого закона термодинамики для потока газа?
3. Преобразуйте уравнение первого закона термодинамики к виду, соответствующему адиабатному течению идеального газа по горизонтальному каналу без совершения технической работы.

4. Как записываются уравнения движения и неразрывности для одномерного стационарного потока?
5. Какие каналы называются соплами, а какие диффузорами?
6. Как записывается математическое выражение закона геометрического обращения воздействия?
7. Определите с помощью закона геометрического обращения воздействия характер изменения скорости дозвукового потока в расширяющемся канале.
8. Какова методика определения теоретических значений скорости и расхода газа при истечении его через суживающееся сопло?
9. Какое наибольшее значение скорости газового потока может быть получено в суживающемся сопле?
10. Как изменяется с уменьшением отношения давлений расход газа через суживающееся сопло?
11. Как определяется теоретическое значение критического отношения давлений?
12. В чем заключается физическая сущность явления кризиса течения газа?

Лабораторная работа № 6
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ПОРШНЕВОМ КОМПРЕССОРЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Изучение основных термодинамических процессов, происходящих в поршневом компрессоре, и определение характеризующих их величин.
- 1.2. Определение показателя политропы, работы, затрачиваемой на сжатие газа в различных процессах.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Экспериментальное определение параметров воздуха на входе и выходе поршневого компрессора.
- 2.2. Расчет на основе полученных экспериментальных данных показателя политропы, теплоты и работы, затрачиваемой на сжатие газа в различных процессах.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Устройство компрессора

Сжатый воздух находит широкое применение в различных отраслях техники. Машины, применяемые для сжатия и перемещения газа, называются компрессорами.

По способу сжатия газа компрессоры разделяются на две группы. К первой группе относятся компрессоры статического действия или объемные компрессоры (поршневые, шестеренчатые, ротационные). Повышение давления в них достигается путем уменьшения объема газа, поступившего в рабочее пространство компрессора.

Ко второй группе относятся компрессоры динамического действия. К ним относятся центробежные, осевые и диагональные компрессоры. В этой группе компрессоров сжатие осуществляется в два этапа. В начале газ

приобретает некоторый запас кинетической энергии, затем происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную (энергию давления).

Несмотря на конструктивные различия указанных типов компрессоров, процессы сжатия газа в них с точки зрения термодинамики одинаковы.

Дальнейший анализ проводится применительно к поршневому компрессору.

На рисунке 6.1 в координатах P - V (V – объем газа в цилиндре при различных положениях поршня) представлена индикаторная диаграмма процесса сжатия газа в одноступенчатом компрессоре и под ней схема компрессора.

Принцип работы компрессора заключается в следующем. При ходе поршня из верхней мертвой точки (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ) в цилиндр засасывается газ (процесс 0-1), который при обратном ходе поршня сначала сжимается (процесс 1-2), а потом выталкивается в газосборник (процесс 2-3). В крышке цилиндра компрессора располагаются впускной и выпускной клапаны (8 и 9), работающие под действием перепада давлений.

При засасывании газа (воздуха) впускной клапан открыт, а выпускной закрыт. В процессе сжатия воздуха, продолжающегося на части обратного хода поршня, оба клапана закрыты. По окончании процесса сжатия выпускной клапан открывается (точка 2), а поршень на оставшейся части пути до верхней мертвой точки выталкивает сжатый газ в газосборник.

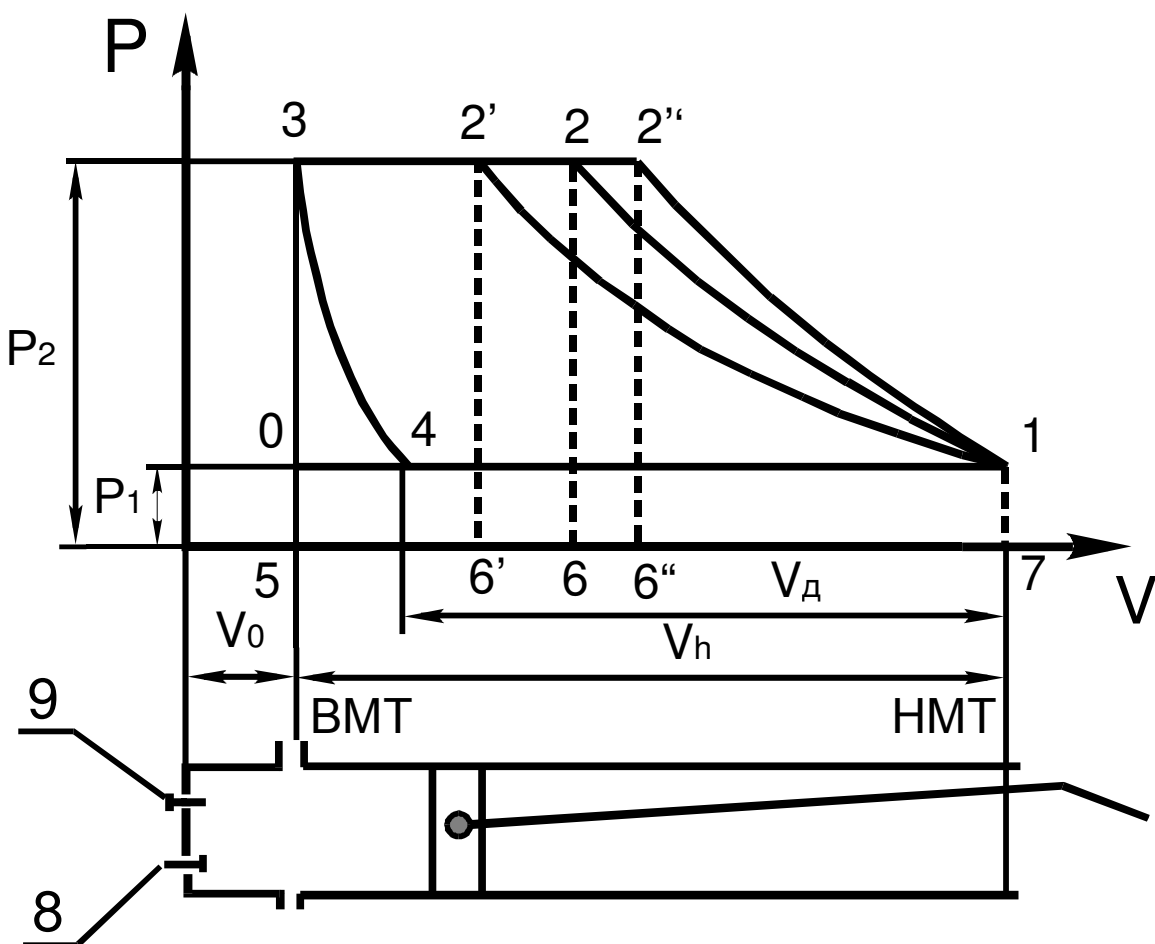


Рис. 6.1

Так как процессы 4-1 и 2-3 не являются термодинамическими, то есть идут с неизменными термодинамическими параметрами (меняется лишь масса газа в цилиндре), то совокупность процессов, изображенных на рисунке 6.1, строго говоря, не является замкнутым термодинамическим циклом. Однако для удобства анализа эту диаграмму рассматривают как цикл идеального компрессора. Линия сжатия, в зависимости от количества отводимого от газа тепла (интенсивности охлаждения цилиндра охлаждающей жидкостью или воздухом), может быть изотермой 1-2', адиабатой 1-2'', или политропой 1-2. В диаграмме T-S эти процессы изображены на рисунке 3.2.

3.2. Работа компрессора

Работа, затрачиваемая на получение 1 кг сжатого газа в одноступенчатом компрессоре, графически изображается площадью 4-1-2-3 (рис.6.1), которая является алгебраической суммой площадей:

$$F_{01230} = F_{23562} + F_{12671} - F_{01750},$$

где $F_{23562} = l_1 = P_2 V_2$ – работа нагнетания;

$$F_{12671} = l_2 = \int_{V_1}^{V_2} P dV \text{ – работа сжатия;}$$

$F_{01750} = l_3 = P_1 V_1$ – работа наполнения (отрицательная, потому что при всасывании газ сам совершает работу над поршнем).

В соответствии с таким обозначением суммарная работа будет равна:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 = P_2 V_2 + \int_{V_1}^{V_2} P dV - P_1 V_1.$$

В этом выражении $\int_{V_1}^{V_2} P dV$ зависит от характера процесса сжатия.

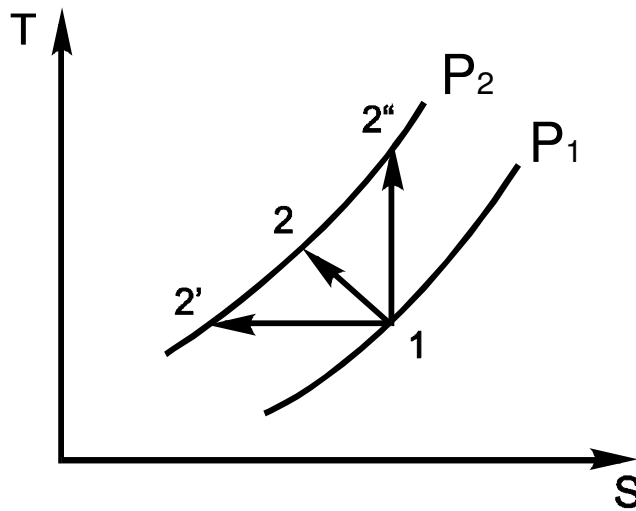


Рис. 6.2

1. При изотермическом сжатии:

$$l_{из} = -RT_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.1)$$

2. В случае политропного сжатия:

$$l = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (6.2)$$

где n – показатель политропы.

3. При адиабатном сжатии:

$$l = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (6.3)$$

k – показатель адиабаты.

Вычисленная таким образом величина работы используется при определении энергетических затрат, необходимых для получения определенного количества газа при заданных параметрах начала и конца сжатия.

Как следует из рисунка 3.1 и сопоставления формул (6.1), (6.2) и (6.3), наименьшая суммарная работа затрачивается при изотермическом сжатии газа. Кроме того, вследствие постоянства температуры в этом процессе создаются благоприятные условия для смазки.

В действительных компрессорах получить изотермическое сжатие практически невозможно, однако стремятся максимально приблизиться к нему, т.е. вести процесс сжатия с показателем политропы $n \rightarrow 1$ (отвод тепла). Поэтому при определении эффективности охлаждаемых поршневых компрессоров величина действительной работы сравнивается с изотермической. Отношение их дает изотермический КПД ($\eta_n < 1$).

3.3. Действительная индикаторная диаграмма компрессора

В рассмотренных выше случаях предполагалось, что весь объем цилиндра является рабочим. В действительности же между крышкой цилиндра и поршнем в его крайнем левом положении (ВМТ) всегда остается так называемое «вредное пространство», в котором остается невытолкнутый в систему сжатый газ. При обратном ходе поршня оставшийся газ расширяется и занимает к моменту открытия впускного клапана часть объема рабочей полости цилиндра. На эту величину уменьшается объем всасываемого газа.

Таким образом, наличие вредного пространства вводит новый процесс в теоретическую индикаторную диаграмму – процесс расширения 3-4 (рис.6.1, 6.2).

3.4. Объемный КПД компрессора

Отношение действительного объема всасывания (V, V', V'') к рабочему объему цилиндра V_h называется объемным КПД:

$$\eta_v = \frac{V}{V_h},$$

а отношение $\frac{V_o}{V_h} = \varphi$ – относительной величиной «вредного пространства» ($\varphi = 0,01-0,03$).

Очевидно, что с увеличением объема вредного пространства (V_o), будет уменьшаться действительный объем всасывания и объемный КПД, а следовательно, и производительность компрессора. На объемный КПД в значительной степени оказывает влияние величина конечного давления сжатия. Как следует из рисунка 3.3, его увеличение (точки 2', 2'', ..) уменьшает объемный КПД. В пределе, когда кривая процесса сжатия (линия 1-2) пересечет линию вредного пространства, всасывание газа в цилиндр

компрессора прекратится, и будет повторяться сжатие и расширение одного и того же объема (объемный КПД $\eta_v = 0$).

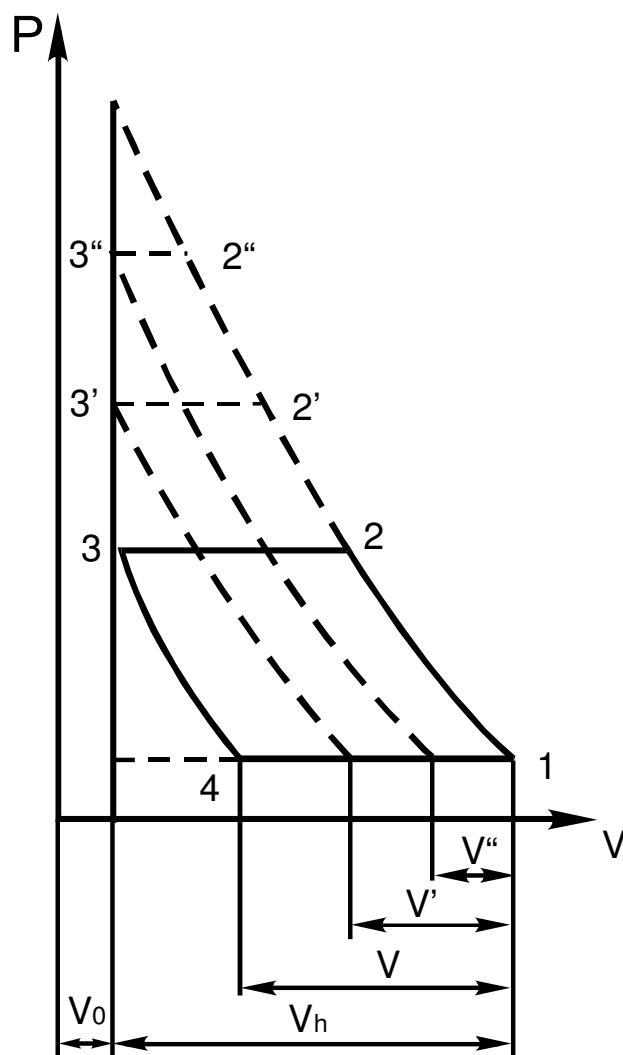


Рис. 6.3

3.5. Гидравлические потери в распределительных органах компрессора

На величину суммарной работы сжатия оказывают влияние и гидравлические потери в распределительных органах (клапанах всасывания и нагнетания). На действительной индикаторной диаграмме в результате этого появляются характерные выступы вначале всасывания и нагнетания (рис.6.4), давление на впуске снижается, а на нагнетании возрастает. В результате площадь действительной индикаторной диаграммы получается больше теоретической (теоретическая диаграмма ограничена штриховыми линиями)

в 1,04 – 1,12 раза. Соответственно увеличивается и действительная работа сжатия. Потери в распределительных органах обычно учитываются уменьшением объемного КПД на 4-6%.

Приведенный выше анализ показывает, что одноступенчатый поршневой компрессор не может быть применен для получения сжатого газа высокого давления вследствие уменьшения производительности с увеличением конечного давления и ухудшения условий смазки при этом (возможно самовоспламенение смазки при недостаточном охлаждении). Пределом для одноступенчатого компрессора обычно является давление конца сжатия в 10 – 12 ата.

3.6. Многоступенчатые компрессоры

Для получения сжатого газа высокого давления применяется многоступенчатый компрессор. Сжатие газа в нем осуществляется последовательно в нескольких цилиндрах с промежуточным охлаждением газа в холодильниках 1 и 2 (рис. 6.3) между ступенями I, II и III. При этом охлаждение газа в холодильниках после каждой ступени производится при постоянном давлении.

Многоступенчатое сжатие позволяет:

1. Создать температурный режим, допустимый из условий смазки, и обеспечить надежную эксплуатацию компрессора;
2. Повысить объемный КПД вследствие понижения перепада давлений в каждой ступени;
3. Уменьшить мощность, потребляемую на привод компрессора, путем дополнительного охлаждения газов в холодильниках, приближая процесс сжатия к изотермическому.

Для анализа и получения расчетных формул принимают следующие основные условия работы многоступенчатого компрессора:

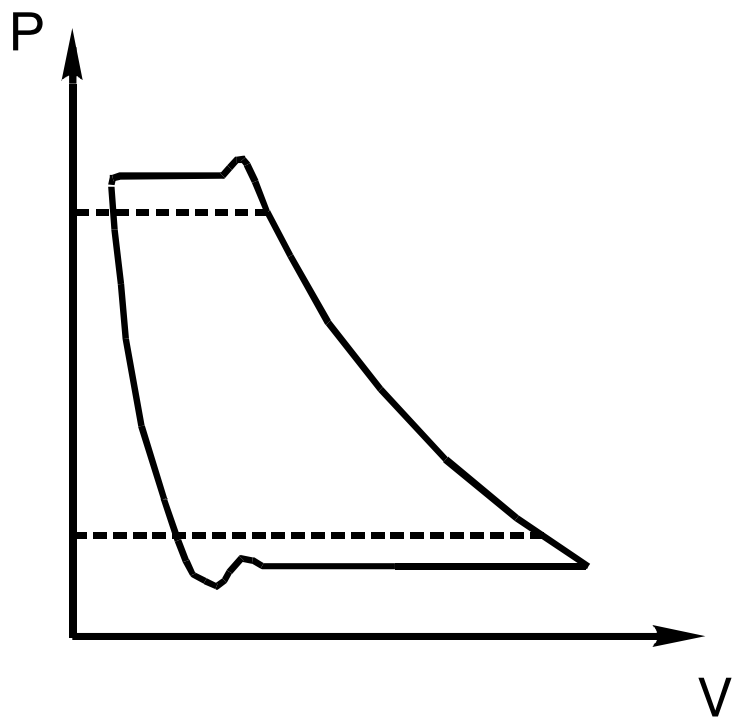
1. Работа всех холодильников должна осуществляться при $P = const$, т.е.

$$P_2 = P_3 \text{ и } P_4 = P_5.$$

2. Охлаждение газа во всех холодильниках должно быть полным, т.е.

$$t_5 = t_3 = t_1.$$

3. Сжатие газа во всех цилиндрах должно доводиться до одной и той же температуры t_2 , обеспечивающей надежные условия смазки, т.е.



$$t_6 = t_4 = t_2.$$

Рис. 6.4.

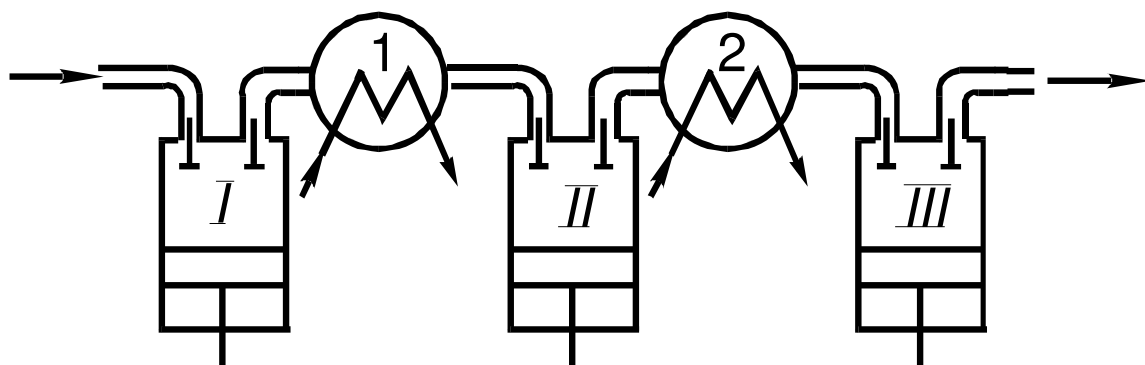


Рис. 6.5.

На рисунке 6.6 изображена диаграмма процессов сжатия газа в трехступенчатом компрессоре:

- 10 – 1 – всасывание газа в первую ступень;

- 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6 – политропные процессы сжатия газа в соответствующих ступенях;
- 2 – 9 и 4 – 8 – процессы нагнетания газа в холодильники после I и II ступеней;
- 9 – 3 и 8 – 5 – процессы всасывания газа во II и III ступени из холодильников;
- 6 – 7 – процесс нагнетания газа из III ступени к потребителю.

Площади I, II, III в этой системе координат представляют работу, затрачиваемую на получение сжатого газа в ступенях; площади IV и V – уменьшение работы сжатия вследствие охлаждения газа в холодильниках.

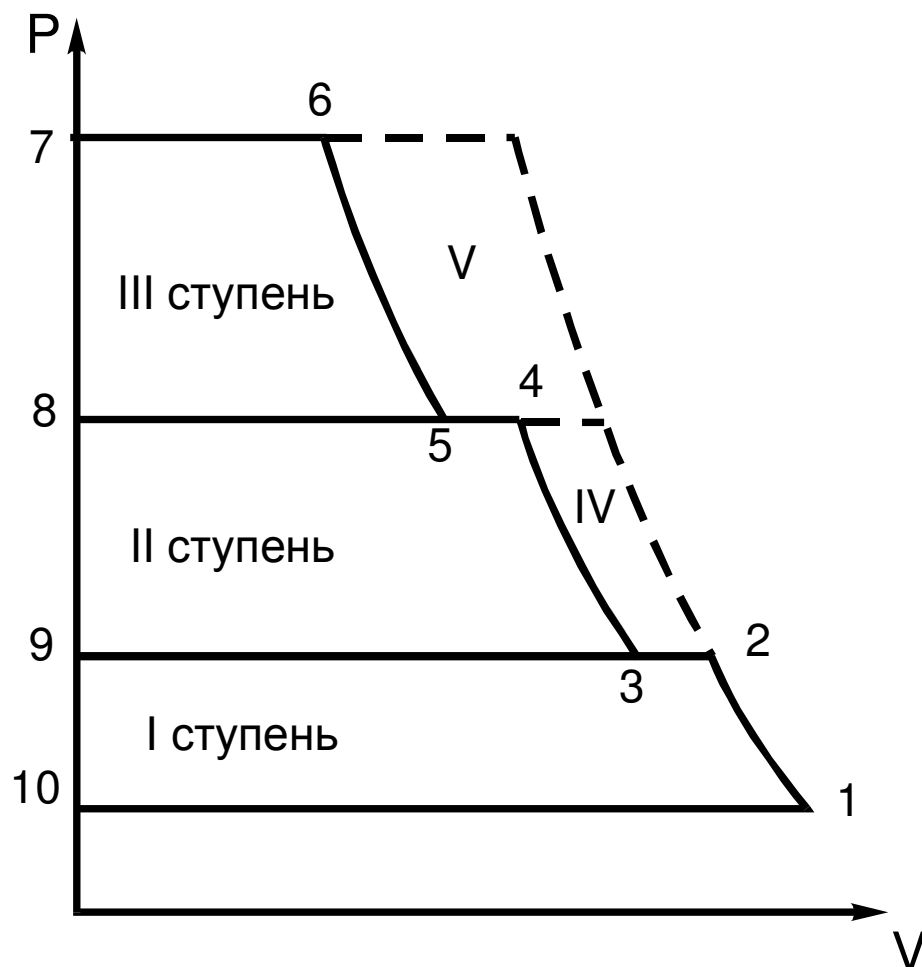


Рис. 6.6

На рисунке 6.7 изображен в системе координат TS адиабатный процесс сжатия газа в 3-ступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением.

Вертикальные линии $1-2$, $3-4$, $5-6$ – адиабаты сжатия газа в соответствующих ступенях; линии $2-3$ и $4-5$ – изобарное охлаждение газа в промежуточных холодильниках.

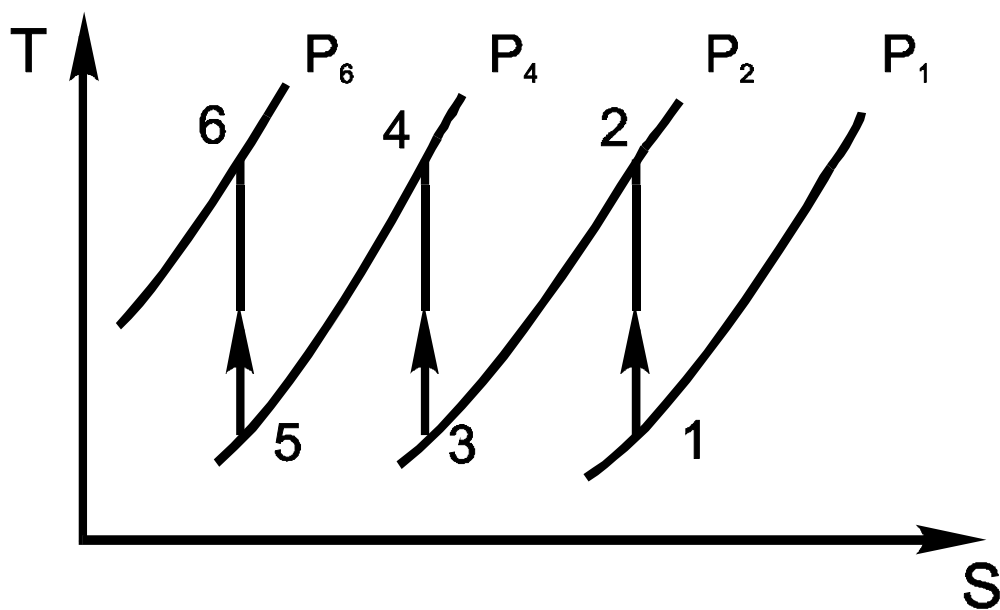


Рис. 6.7

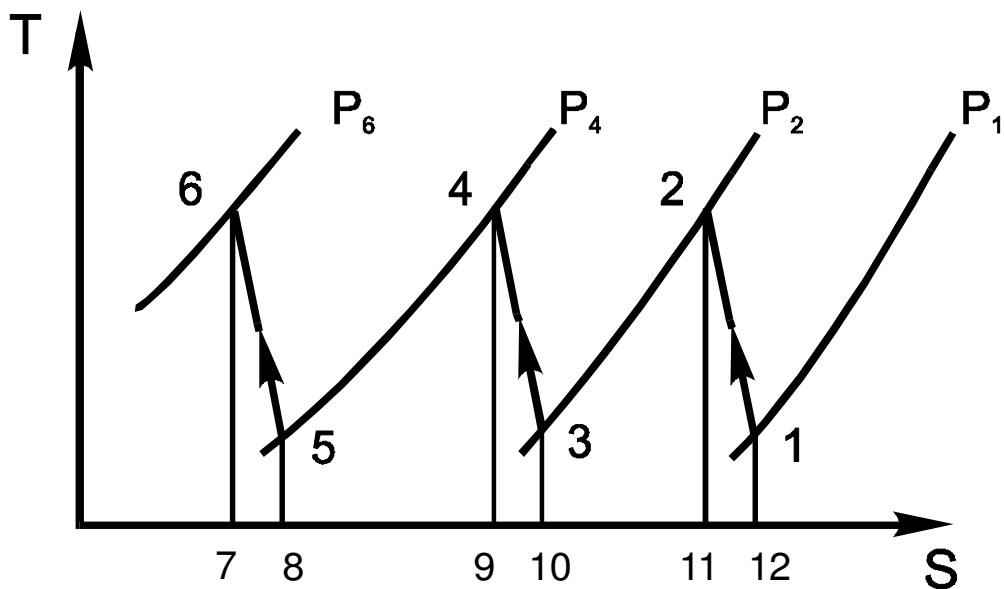


Рис. 6.8

На рисунке 6.8 в той же системе координат представлен политропный процесс сжатия газа в 3-ступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением.

Здесь линии 1–2, 3–4, 5–6 – политропы сжатия газа в соответствующих ступенях.

Такое расположение линий (с уменьшением энтропии) говорит о том, что процессы сжатия в каждой ступени идут с охлаждением газа ($n < k$). Площади 1–2–11–12–1, 3–4–9–10–3 и 5–6–7–8–5 численно равны количеству тепла, отводимого от газа при сжатии в отдельных ступенях (цилиндрах) и передаваемого среде охлаждающей стенки компрессора.

Площади 2–3–10–11–2 и 4–5–8–9–4 численно равны количеству тепла, отводимого при изобарном охлаждении газа в первом и втором холодильниках. Изобары в рассматриваемой системе координат эквидистантны, и, следовательно, в обоих холодильниках отводится одинаковое количество тепла.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема лабораторной установки

Установка (рис. 6.9) состоит из поршневого компрессора 1 соединенного с электродвигателем 5. Электродвигатель 5 подключается к электросети напряжением 220В через автотрансформатор 6, который позволяет плавно регулировать частоту вращения электродвигателя. Параметры воздуха на входе в компрессор измеряются с помощью барометра и термометра, которые находятся в лаборатории. Температура воздуха после сжатия в компрессоре регистрируется потенциометром 2, к которому подключается термопара, установленная в нагнетательной магистрали компрессора. Нагнетательная магистраль компрессора соединяется с ресивером 4, в полость которого собирается сжатый воздух. Давление после сжатия в компрессоре регистрируются по манометру 3, который вмонтирован

в ресивер. На выходе из ресивера установлен регулировочный вентиль, который позволяет регулировать расход воздуха из ресивера (на схеме не показан).

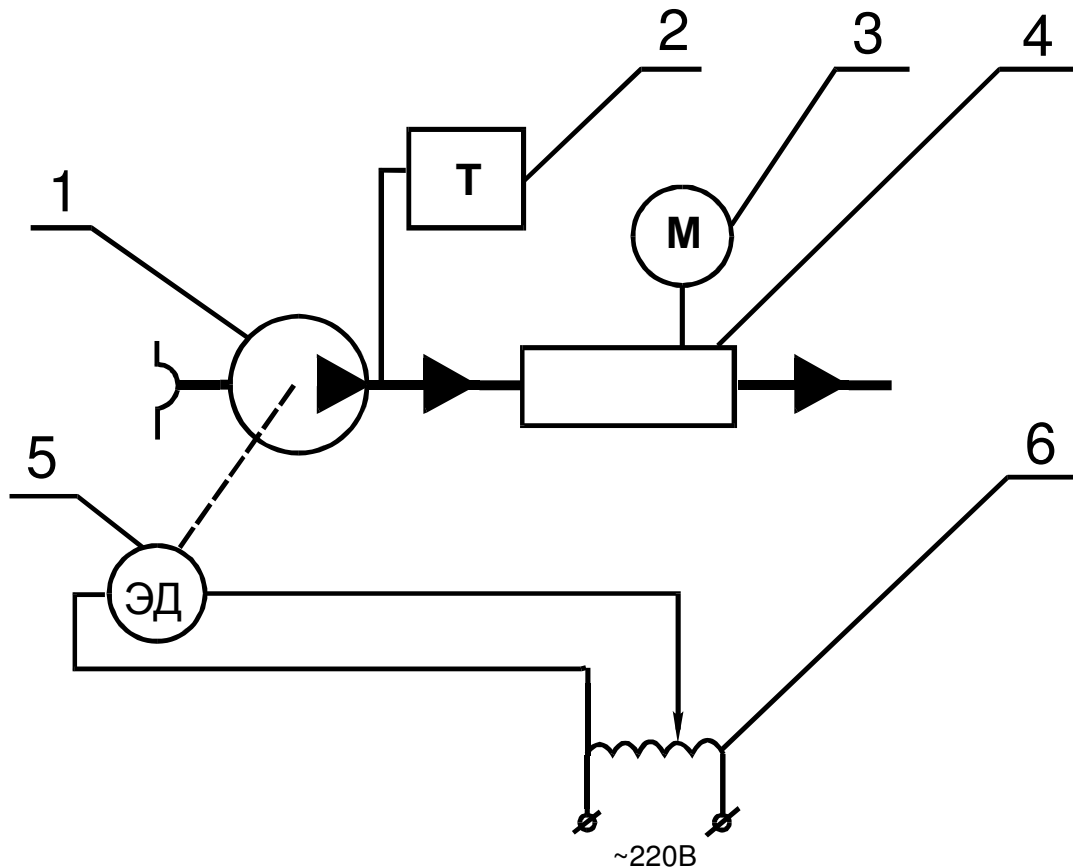


Рис. 6.9.

5. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении лабораторной работы необходимо выполнять следующие правила техники безопасности:

- 1) Включение опытной установки в сеть и отключение ее от сети производить только с разрешения преподавателя;
- 2) Немедленно отключить электропитание установки в случаях ощущения действия электрического напряжения на корпусе приборов, дымления автотрансформатора, дымления или самопроизвольного снижения оборотов электродвигателя;

- 3) Запрещается оставлять работающую установку без присмотра, отсоединять проводники от приборов установки, самостоятельно устранять неисправности электропроводки;
- 4) Следить за исправной работой системы смазки;
- 5) При обнаружении каких-либо неисправностей в установке, необходимо немедленно прекратить работу на установке и поставить в известность преподавателя.

6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Методика проведения эксперимента

- 6.1.1. Изучить правила техники безопасности при работе на данной лабораторной установке.
- 6.1.2. Включить в сеть автотрансформатор и установить с его помощью необходимую частоту вращения электродвигателя (устанавливается преподавателем).
- 6.1.3. Через пять минут после включения электродвигателя производится измерение давления $P_2^{изб}$ и температуры t_2 воздуха на выходе из компрессора.
- 6.1.4. По указанию преподавателя устанавливаются различные значения давления $P_2^{изб}$ с помощью регулировочного вентиля в диапазоне значений 3 – 6 кгс/см². Результаты измерений заносятся в таблице 6.1.

Таблица 6.1

В	t_1	$P_2^{изб}$	t_2
мм.рт.ст.	$^{\circ}\text{C}$	кгс/см ²	$^{\circ}\text{C}$

6.2. Обработка экспериментальных данных

- 6.2.1. Абсолютная температура воздуха на входе в компрессор:

$$T_1 = t_1 + 273 [K] . \quad (6.1)$$

6.2.2. Абсолютное давление воздуха на входе в компрессор:

$$P_1 = 133,3 \cdot B \quad [Па] . \quad (6.2)$$

6.2.3. Абсолютная температура воздуха на выходе из компрессора:

$$T_2 = t_2 + 273 [K] . \quad (6.3)$$

6.2.4. Абсолютное давление воздуха на выходе из компрессора:

$$P_2 = P_1 + 9,8 \cdot 10^4 \cdot P_2^{изб} \quad [Па] . \quad (6.4)$$

6.2.5. Показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} . \quad (6.5)$$

6.2.6. Количество теплоты, отводимое в систему охлаждения цилиндра компрессора от 1 кг воздуха при политропном сжатии:

$$q_{пол} = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) \quad [Дж / кг], \quad (6.6)$$

где $c_v = 716 \left[\frac{Дж}{кг \cdot K} \right]$ – массовая теплоемкость воздуха в изохорном процессе;

$k = 1,4$ – показатель адиабаты воздуха;

n – показатель политропы воздуха, определенный в п.5.2.5.

6.2.7. Количество теплоты, отводимое в систему охлаждения цилиндра компрессора от 1 кг воздуха при изотермическом сжатии:

$$q_{из} = -R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad [Дж / кг], \quad (6.7)$$

где $R = 287 \left[\frac{Дж}{кг \cdot K} \right]$ – газовая постоянная воздуха.

6.2.8. Теоретическая работа, затраченная в компрессоре на сжатие 1 кг воздуха при изотермическом сжатии:

$$l_{из} = q_{из} \quad [Дж / кг]. \quad (6.8)$$

6.2.9. Теоретическая работа, затраченная в компрессоре на сжатие 1кг воздуха при политропном сжатии:

$$l_{пол} = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad [Дж / кг]. \quad (6.9)$$

6.2.10. Теоретическая работа, затраченная в компрессоре на сжатие 1кг воздуха при адиабатном сжатии:

$$l_{ад} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad [Дж / кг]. \quad (6.10)$$

Результаты расчетов сводятся в таблице 6.2.

Таблица 6.2.

P_1	T_1	P_2	T_2	n	$q_{пол}$	$q_{из}$	$l_{из}$	$l_{пол}$	$l_{ад}$
Па	К	Па	К	—	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Отчет оформляется на листах формата А4 в соответствии с ГОСТ.

Образец оформления работы представлен в методическом уголке лаборатории теплотехники.

7.2. Отчет должен содержать:

1. Цель работы;
2. Индикаторную диаграмму (рис. 6.1);
3. Опытные данные (табл. 6.1);
4. Расчетные формулы и результаты обработки опытных данных (табл. 6.2);

7.3. Расчеты необходимо выполнять в системе СИ.

7.4. Работа должна быть сброшюрована.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 8.1. Назначение компрессора. Типы компрессоров по способу сжатия. Принцип действия компрессоров статического и динамического сжатия.
- 8.2. Проанализируйте процессы, происходящие в одноступенчатом поршневом компрессоре, изобразите эти процессы в координатах PV .
- 8.3. Чем отличается действительная индикаторная диаграмма от теоретической?
- 8.4. Почему нельзя получить газ высокого давления в одноступенчатом компрессоре? Каков предел давления конца сжатия для одноступенчатого компрессора?
- 8.5. Что такое объемный КПД компрессора, от каких параметров и каким образом он зависит?
- 8.6. Какой процесс сжатия в компрессоре выгоднее с точки зрения энергетических затрат? Проанализируйте различные процессы с использованием PV и TS -диаграмм.
- 8.7. Изотермическая, политропная и адиабатная работа компрессора. Сравнить графически.
- 8.8. Проанализируйте процессы, происходящие в 2-ступенчатом поршневом компрессоре с промежуточным охлаждением, изобразив их в координатах PV и TS .
- 8.9. Проанализируйте преимущества многоступенчатого сжатия с использованием PV и TS -диаграмм.
- 8.10. Что такое «вредное» пространство? Влияние «вредного» пространства на работу компрессора. Относительная величина «вредного» пространства.
- 8.11. Что ограничивает значение давления конца сжатия?
- 8.12. Как влияют гидравлические потери в распределительных органах (клапанах) на работу компрессора?

Лабораторная работа №7
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО НАСОСА
(ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТИПА)

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Определение эффективности работы теплового насоса.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

1. Ознакомление со схемой теплового насоса и принципом действия установки;
2. Составление теплового баланса;
3. Определение эффективности использования тепловой энергии;
4. Построение диаграммы Сенкея;
5. Составление эксергетического баланса;
6. Определение эксергетического к.п.д. установки;
7. Построение диаграммы Гроссмана–Шаргута.

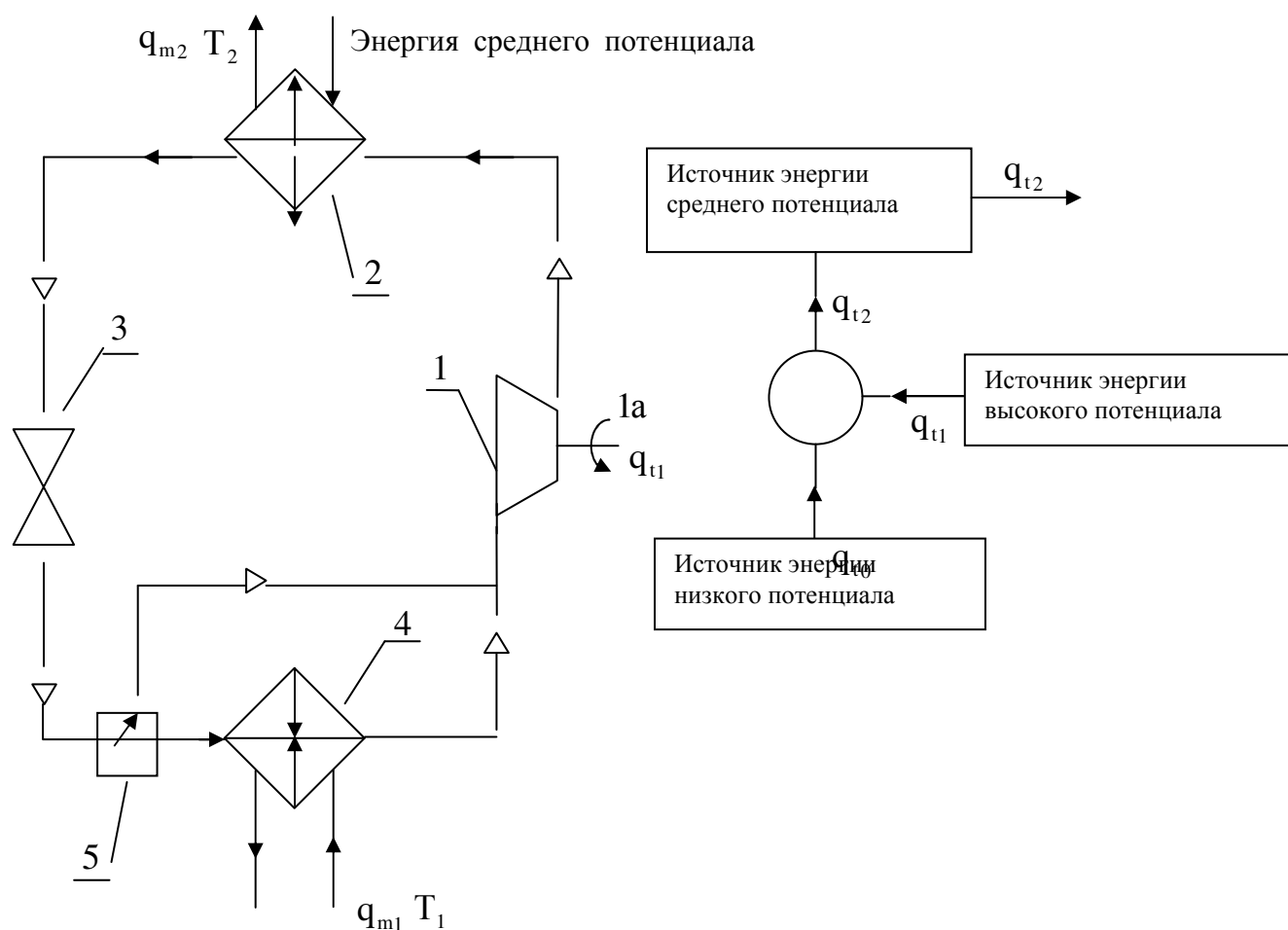
Индивидуальные задания для расчета теплового насоса:

Фреоны	Ф-11	<u>Ф-12</u>	Ф-22	Ф-113	Ф-114	Ф-115	Ф-13B1
Формула	CCl_3F	CCl_2F_2	CHClF_2	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	C_2ClF_6	CBrF_3
$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	-111,1	-155,0	-160	-35	-94	-106	-143,2
$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	23,77	<u>-29,80</u>	-40,80	47,52	3,55	-38,00	-58,70
d^t	1,4870 ^Г	1,442 ^В	1,4909 ^Д	1,5764 ^Г	1,57 ^В	1,57 ^В	1,57 ^В
$t_{\text{крит}}, ^\circ\text{C}$	196	111,5	96,0	214,1	145,7	80,0	67,0
$P_{\text{крит}}, \text{ат}$	44,6	40,95	50,4	34,8	33,8	31,0	41,3
$d_{\text{крит}}, \text{кг/л}$	0,554	0,555	0,525	0,576	0,582	-	-
Теплота испарения при $t_{\text{кип}}$, ккал/моль	43,51	39,90	55,90	35,04	32,80	32,80	29,7

Удельная теплоемкость, ккал / кг · град	0,208	0,204	0,265	0,226	0,232	0,232	0,190
Хладопроизводитель ность, ккал / м ³	49,20 ^a	305,6	495,5	17,6	90,2	490,0	161 ^b

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Тепловой насос (парокомпрессионного типа)



1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – дроссель; 4 – испаритель;
5 – фазоразделитель;

q_{m1} – поток носителя потенциал энергии которого необходимо повысить;

q_{m2} – поток носителя с повышенным потенциалом.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В испаритель поступает вторичный энергоноситель. Испаритель нагревает его до температуры кипения и испаряет. Образовавшиеся пары попадают в компрессор, где их сжимают и они нагреваются. Сжатый газ поступает в дроссель, в котором расширяется до атмосферного давления. Эта смесь попадает в фазоразделитель. Жидкость – в испаритель, а газ – в компрессор.

Для того чтобы схема заработала, надо подводить энергию на компрессор.

Потенциальная энергия возрастает потому, что при сжатии паров возрастает давление и следовательно возрастает температура конденсации и следовательно повышается потенциал носителя тепла q_{m2} по сравнению потенциалом носителя q_{m1} .

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА:

1. Тепловой баланс теплового насоса (без учета потерь)

$$q_{t2} = q_{t1} + q_{t0}.$$

2. Эффективность трансформации энергии при применении теплового насоса определяется коэффициентом преобразования, который независимо от эффективности самого теплового насоса всегда больше единицы:

$$\varphi = \frac{q_{t2}}{q_{t1}} = \frac{q_{t1} + q_{t0}}{q_{t1}} = 1 + \frac{q_{t0}}{q_{t1}}; \quad \frac{q_{t0}}{q_{t1}} = b.$$

В замкнутом контуре теплового насоса циркулирует рабочий агент (например – хладон). Компрессор, потребляя энергию извне, обеспечивает циркуляцию агента по контуру. В испарителе 4 рабочий агент испаряется, отбирая тепло от внешнего потока q_{m1} ; в конденсаторе конденсируется,

отдавая теплоту внешнему потоку q_{m_2} . Назначение дросселя – для сброса давления.

Схема может работать для производства холода (оборудование 1, 3, 4, 5), либо для подъема потенциала (тогда работают все 5).

3. Коэффициент преобразования как идеального, так и реального теплового насоса выражается через температуры процесса, следующим образом:

$$\Phi_{\text{е\textsubscript{с}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{е}}}{\dot{Q}_{\text{е}} - \dot{Q}_{\text{и}}},$$

где $T_{\text{к}}$, $T_{\text{и}}$ – температура конденсации и кипения в конденсаторе и испарителе теплового насоса, соответственно, °K.

4. Количество тепловой энергии воспринимаемое хладоном в испарителе:

$$q_{t_4} = q_{m_1} \cdot c_p \cdot (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}}).$$

5. Количество испарившегося в аппарате хладона:

$$q_{m_{\text{хл}}} = \frac{q_{t_4}}{r_{\text{хл}}}.$$

В компрессоре осуществляется адиабатическое сжатие хладона от давления начального p_1 до давления p_2 , обеспечивающего нагрев паров до температуры T . Энергия, затрачиваемая на сжатие в компрессоре:

$$q_{\text{сж}} = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot \frac{q_{m_{\text{хл}}}}{\rho_{\text{хл}}} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

6. Температура газов в конце адиабатического сжатия:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

7. Количество тепла, отдаваемое парами хладона в конденсаторе:

$$q_{t_2} = q_{m_{\text{хл}}} \cdot r_{\text{хл}}.$$

8. Количество воды, нагреваемое в конденсаторе от температуры $T_{2\text{н}}$ до температуры $T_{2\text{к}}$:

$$q_{m_2} = \frac{q_{t_2}}{c_p \cdot (T_{2\text{к}} - T_{2\text{н}})}$$

9. Эксергия потоков, поступающих на установку:

$$E_{\text{вх}} = q_{m_1} \cdot c_{p_1} \cdot T_{1_H} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{1_H}}\right) + q_{m_2} \cdot c_{p_2} \cdot T_{2_H} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{2_H}}\right) + \frac{q_{\text{сж}}}{\eta_{\text{сж}}}.$$

10. Эксергия потоков, уходящих с установки:

$$E_{\text{вых}} = q_{m_1} \cdot c_{p_1} \cdot T_{1_K} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{1_K}}\right) + q_{m_2} \cdot c_{p_2} \cdot T_{2_K} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{2_K}}\right).$$

11. Определить эксергетический коэффициент эффективности использования энергоресурсов

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\Delta E}{E_{\text{вх}}}.$$

Построить диаграмму Гроссмана – Шергута:

1а – электродвигатель;

1 – компрессор;

2 – конденсатор (высокого давления);

3 – дроссель (охлаждение с понижением давления);

4 – испаритель (низкого давления).

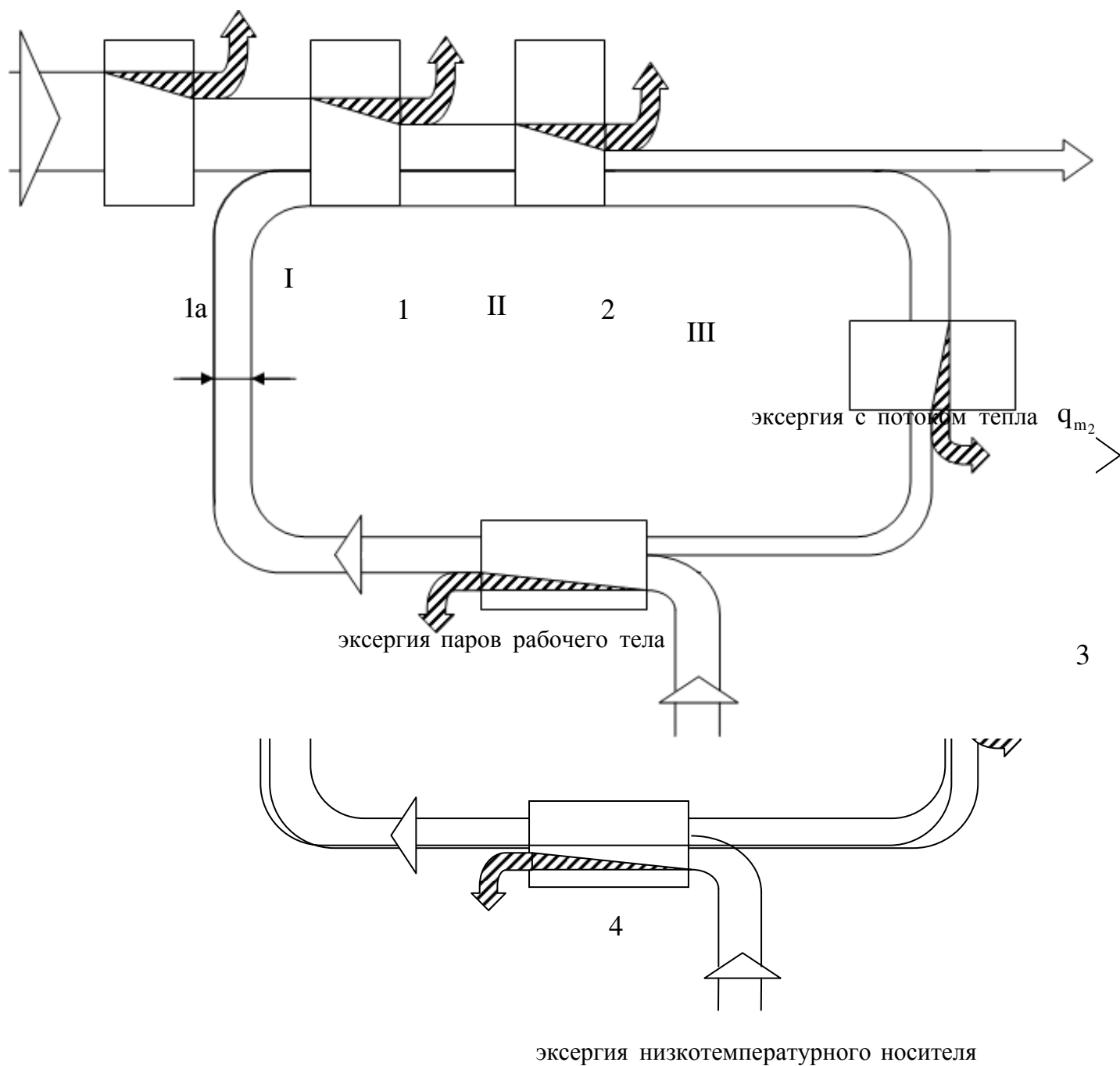
I – потери в электродвигателе и приводе;

II – потери в компрессоре при сжатии;

III – потери в конденсаторе при теплопередаче.

12. Определить эксергетический коэффициент эффективности использования энергоресурсов

$$\eta_{\text{ýò}} = \frac{\dot{A}_{\text{âüð}}}{\dot{A}_{\text{âõ}}} = 1 - \frac{\Delta \dot{A}}{\dot{A}_{\text{âõ}}}.$$



6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схему объекта;
2. Индивидуальное задание;
3. Методику расчета и результаты;
4. Диаграмму Сенкея;
5. Значение коэффициента эффективности;
6. Выводы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение теплового насоса;
2. Каким образом обеспечивается использование низкопотенциального теплового ресурса;
3. Как оценивается эффективность использования энергии.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П. 1.1

Свойства горючих веществ (топлив)

	содержание компонентов, массовые доли			теплота сгорания
Горючее	C ^p	H ^p	O ^p	Q, кДж/кг
Бензин	0,85	0,15	-----	45000
Керосин	0,86	0,14	-----	43150
Соляровое масло	0,865	0,135	-----	42300
Мазут	0,87	0,13	-----	40650
Этанол	0,52	0,13	0,35	27100
Метанол	0,375	0,125	0,5	20060
Пропан	0,818	0,182	-----	46400
Бутан	0,827	0,173	-----	45800
Метан	0,75	0,25	-----	55644
Этан	0,800	0,200	-----	53003

Таблица П. 1.2

Уравнения для определения средних изохорных массовых теплоемкостей (c_v), (в интервале 0...Т, К)

Газ	Формула теплоемкости, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$R_{\text{м}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	показатель адиабаты
Воздух	$0,691 + 7,1 \cdot 10^{-5} \cdot T$	0,293	1,40
CO ₂	$0,775 + 11,7 \cdot 10^{-5} \cdot T$	0,189	1,31
H ₂ O (пар)	$1,328 + 28,07 \cdot 10^{-5} \cdot T$	0,462	
Азот	$0,716 + 7,54 \cdot 10^{-5} \cdot T$	0,267	1,40
O ₂	$0,628 + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot T$	0,260	1,40
Метан	$1,09 + 3,779 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,519	1,32
Этан	$0,149 + 6,077 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,277	1,20
Пропан	$-0,101 + 6,984 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,189	1,16
Бутан	$0,008 + 5,790 \cdot 10^{-3} \cdot T$	0,143	1,10

Таблица П.3.2

**Термодинамические свойства пара и воды в состоянии насыщения
(по давлению)**

р, бар	$t_{\text{н}},$ $^{\circ}\text{C}$	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$S',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$S'',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0,010	6,936	0,0010001	130,04	0,007690	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,020	17,486	0,0010014	67,24	0,01487	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,025	21,071	0,0010021	54,42	0,01838	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,030	24,071	0,0010028	45,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,3	0,3547	8,5784
0,040	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,34	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010065	23,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,08	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,10	45,82	0,0010102	14,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,14	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,18	57,82	0,0010159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,20	60,08	0,0010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,25	64,99	0,0010198	6,20	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,30	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,4	75,87	0,0010264	3,99	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,5	81,33	0,0010299	3,24	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,6	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,8	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
1,0	99,62	0,0010432	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
1,2	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
1,6	113,31	0,0010543	1,092	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
2,0	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
2,6	128,73	0,0010684	0,929	1,443	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
3,0	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
4,0	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
5	151,84	0,0010927	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
6	158,84	0,001109	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
8	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
10	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867

Таблица П.3.2 (продолжение)

**Термодинамические свойства пара и воды в состоянии насыщения
(по давлению)**

p, бар	$t_{\text{н}},$ $^{\circ}\text{C}$	$v',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$v'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$S',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$S'',$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
14	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
18	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1212,3	2,3975	6,3794
20	212,36	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28	230,04	0,0012088	0,01742	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30	233,83	0,0012164	0,06663	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
35	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1048,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1249
40	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50	264,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	2,0276	5,8894
70	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,5783
100	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,6101	5,6147
110	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120	324,64	0,001527	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130	330,81	0,001568	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140	330,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,9	3,6233	5,3731
160	347,32	0,001710	0,009319	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
180	356,96	0,001839	0,007505	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
200	365,71	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016,0	2168,0	152,0	4,3030	4,5910

Таблица П.4.1

**Физические параметры воды на линии насыщения
при давлении 101325 Па (760 мм.рт.ст.)**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p \square, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	13,08	1788,4	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	13,72	1305,7	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	14,33	1004,5	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	14,86	801,5	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	15,31	653,3	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	15,70	549,4	0,556	3,54
60	983,1	4,179	65,9	16,06	469,4	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	16,31	406,1	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	16,56	355,1	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68,0	16,75	314,9	0,326	1,95
100	958,4	4,220	68,4	16,89	282,5	0,295	1,75

Таблица П.4.2

**Физические параметры сухого воздуха при давлении
101325 Па (760 мм.рт.ст.)**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p \square, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^8, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,01	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688

Таблица П 4.3.

Критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи

	Уравнение	Пределы применения
Течение в трубах	$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$Re \geq 10^4$
	$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}$	$2300 < Re < 10^4$
	$Nu = 1,4 \cdot \left(Re \cdot \frac{d}{L} \right)^{0,4} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$Gr \leq 4 \cdot Re \cdot Nu$, $Re > 10$, $\frac{L}{d} > 10$
Обтекание труб	$Nu = 0,56 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_\phi$	$Re < 10^3$ для коридорных и шахматных пучков
	$Nu = 0,22 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_\phi$	$Re > 10^3$ для коридорных пучков
	$Nu = 0,4 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_\phi$	$Re > 10^3$ для шахматных пучков
одинокая вертикальная труба или вертикальная поверхность	$Nu = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^9$
	$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$(Gr \cdot Pr) \geq 10^9$
одинокая горизонтальная труба	$Nu = 0,50 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^9$
одинокая горизонтальная труба, обдуваемая потоком среды	$\overline{Nu} = 0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$5 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3$
	$\overline{Nu} = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$	$1 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача.- М.: Высш. Шк., 1975. – С. 313 – 317; 329 – 331.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. - С. 7 – 36.
3. Практикум по теплопередаче / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.Б. Елисеев, В.А. Осипова; Под ред. А.П. Солодова - М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 92 – 98; 125 – 133.
4. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника. М.: Высшая школа, 1986, с. 81 - 89.
5. Баскаков А.П. Теплотехника. М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 52 – 54
6. Практикум по теплопередаче / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.Б. Елисеев, В.А. Осипова; Под ред. А.П. Солодова - М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 92 – 98; 125 – 133.
7. Тишин О.А., Синьков А.В., Мокрецова И.С. Тепловые процессы: учеб. пособие /О.А. Тишин, А.В. Синьков, И.С. Мокрецова; ВПИ (филиал) ВолгГТУ.- Волгоград, 2016.-110 с.
8. Лапшина С.В. Техническая термодинамика и теплотехника Сборник «Учебные пособия» Выпуск 7 [Электронный ресурс]/ С.В. Лапшина, Н.Ю. Бердникова Волгоград, ВолгГТУ 2014 Свидетельство о регистрации № 20689
9. Луканин В.Н. Теплотехника Учебник для вузов 6-ое изд. Стер. ..Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер / под ред Луканина В.Н. Москва Высш. школа 2008.- 671 с. 2-ое изд. 2000.- 671 с.
10. Прибытков И.А. Теоретические основы теплотехники Учебное пособие / И.А. Прибытков, И.А. Левицкий / Под ред. Прибыткова И.А. - М. Академия, 2004-464 с.
11. О.А. Тишин, А.В. Синьков, И.С. Мокрецова, Н.Ю. Бердникова Тепловые процессы при резании металлов: учеб. Пособие / О.А. Тишин, А.А. Синьков, И.С. Мокрецова, Н.Ю. Бердникова ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. 106 с.
12. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника. Учебник для хим.-техн. вузов/ А.В. Чечеткин, Н.А. Занемонец/ М.: Высшая школа, 1986, 344 с.

Дополнительная литература

1. Рабинович Г.П., Рябых П.М., Хохряков П.А. и др. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Под редакцией Судакова Е.Н., 3–е изд. М.: Химия, 1979 г. – 508 с.
2. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974 г. – 448 с.
3. Теплотехника / Под ред. Матвеева Г.А. М., 1981 г.

Электронное учебное издание

Светлана Владимировна **Лапшина**

ТЕПЛОТЕХНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГЕТОВ
(СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ)

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2022 г. Поз. № 45.

Подписано к использованию 16.11.2022. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 4,8.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.