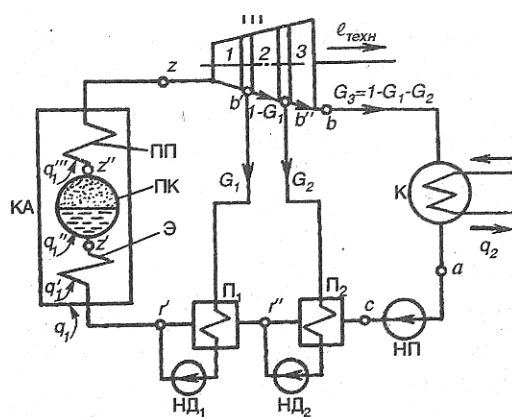


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА  
И ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Методические указания  
к выполнению контрольных работ



Владимир 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

«Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Кафедра “Тепловые двигатели и энергетические установки”

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА  
И ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Методические указания  
к выполнению контрольных работ

Составители:  
В.М.Басуров  
В.Ф.Гуськов

Владимир 2012

УДК 621.43 (07)

Рецензент

Доктор технических наук, профессор

Владимирского государственного университета имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Б.Г. Ким

Печатается по решению редакционно - издательского совета Влади-  
мирского государственного университета.

Техническая термодинамика и теория теплообмена: Метод, указа-  
ния к выполнению контрольных работ / Владим. гос. ун-т; сост.: В.М. Ба-  
суров, В.Ф.Гуськов. Владимир, 2012. 28 с.

Включают задания и методические указания к контрольным работам по тех-  
нической термодинамике и теории теплообмена.

Предназначены для студентов направлений 140100, 141100,  
190100,190600, 190700, 270800. Контрольная работа № 1 написана профес-  
сором В.Ф. Гуськовым, работы № 2 и №3 - доцентом В.М. Басуровым.

В методических указаниях некоторые исходные данные были использованы  
из следующих изданий:

- Техническая термодинамика: Метод, указания к самостоятельной работе  
студентов / Владим. гос. ун-т; Сост.: А.Я. Шкарупило, Ю.Г. Горнушкин,  
А.И. Кольчугина. Владимир, 1997.

- Теория теплообмена: Метод, указания к самостоятельной работе  
студентов / Владим. гос. ун-т; Сост.: А.Я. Шкарупило, А.И. Кольчугина.  
Владимир, 1996.

Табл. 10. Ил. 5. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.43 (07)

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основой процесса обучения в вузе считается самостоятельная работа студентов над материалом, подлежащим усвоению. Важным видом самостоятельной работы является выполнение расчетных, расчетно-графических и других контрольных работ.

В настоящем руководстве приведены исходные данные и методические указания для выполнения трех контрольных работ по дисциплинам "Техническая термодинамика", "Теория теплообмена", "Теплотехника", "Тепломассообмен".

В первой работе рассчитывается идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания, во второй - теоретический цикл паросиловой установки. Третья работа посвящена расчету теплообменного аппарата. Каждая работа кроме элементов теории и методики расчета содержит исследовательскую часть, которая заключается в изучении зависимости показателей совершенства циклов от их важнейших параметров (работы № 1 и 2) и в определении влияния взаимного направления движения теплоносителей на эффективность теплообменного аппарата (работа № 3).

Отчет по каждой контрольной работе оформляется в виде пояснительной записки в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.2-88, которая должна содержать: титульный лист, задание, расчетные формулы и результаты выполненных расчетов, графическую часть и выводы.

### **Контрольная работа № 1** **РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА** **ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Под идеальным циклом двигателя внутреннего сгорания (ДВС) понимают замкнутый обратимый круговой процесс, совершаемый одной и той же несменяемой порцией рабочего тела. В цикле отсутствуют какие-либо потери энергии за исключением передачи теплоты холодному, источнику. Изучение идеальных циклов позволяет проводить анализ и сравнение основных показателей работы двигателей и выявлять факторы, влияющие на их экономичность.

## 1. Задание

1.1. Рассчитать идеальный цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (см. рисунок), включающий следующие термодинамические процессы рабочего тела: адиабатное сжатие  $a - c$ , подвод теплоты по изохоре  $c - z'$ , подвод теплоты по изобаре  $z' - z$ , адиабатное расширение  $z - b$ , отвод теплоты по изохоре  $b - a$ .

Расчет цикла состоит из следующих этапов:

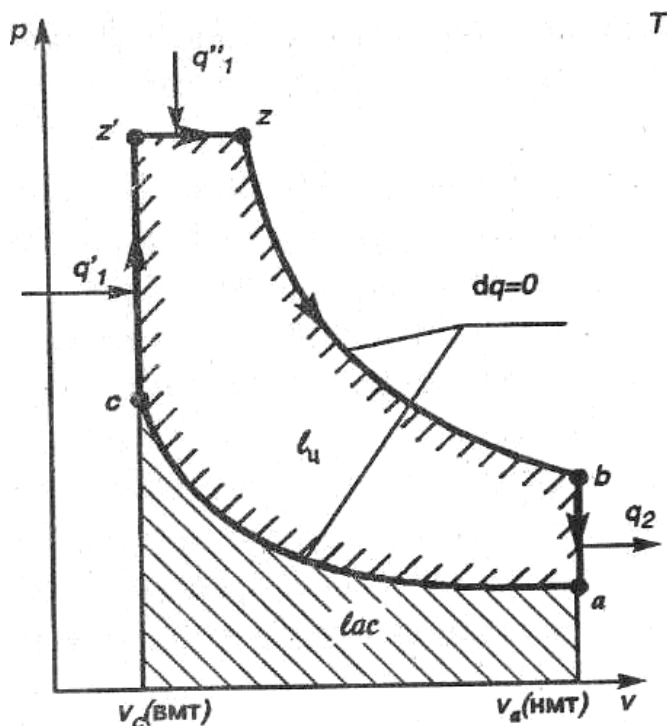
- определение газовой постоянной рабочего тела;
- определение значений давления, удельного объема, температуры, удельной энтропии во всех точках цикла;
- определение изменения внутренней энергии и энтальпии, значений теплоемкости, теплоты и работы для каждого из процессов.

- определение характеристик цикла в целом: количества подведенной и отведенной теплоты, среднего давления и термического КПД.

1.2 Исследовать влияние степени сжатия, степени повышения давления и степени предварительного (изобарного) расширения на термический КПД цикла.

### 1.3 Исходные данные

Исходные данные выбираются из табл. 1 приложения в соответствии с порядковым номером в групповом журнале. Для студентов нечетных групп состав рабочего тела задан *массовыми* долями компонентов, для студентов четных групп - *объемными* долями. В число исходных данных входят также степень сжатия рабочего тела  $\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$ , степень повышения давления  $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ , степень предварительного расширения  $\rho = \frac{v_z}{v_z'}$ . Расчеты выполняются для рабочего тела массой 1 кг при исходных тем-



пературе  $T_a = 293$  К и давлении  $P_a = 10^5$  Па. Теплоемкости рабочего тела считаются постоянными, не зависящими от температуры. Исходные данные записываются в табл.1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета цикла ДВС

Доли компонентов рабочего тела, %				$T$	$P_a$	$\varepsilon$	$\lambda$	$\rho$
CO	H <sub>2</sub>							
				293	$10^5$			

## 2. Методические указания к выполнению расчетов

2.1. Определение газовой постоянной и теплоемкостей рабочего тела. Газовая постоянная рабочего тела (смеси газов)  $R$ , вычисляется по формуле,  $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\right)$ :

$$R = \frac{8314}{\mu},$$

где  $\mu$  - молярная масса смеси,  $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ .

В зависимости от способа задания состава смеси для вычисления  $\mu$  используется одна из следующих формул:

$$\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{g_i}{\mu_i}\right)} \quad \text{или} \quad \mu = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i,$$

где:  $\mu_i$  - молярные массы компонентов смеси (из табл. 2 приложения),  $g_i$  и  $r_i$  - соответственно массовые и объемные доли компонентов,  $n$  - количество компонентов смеси.

Массовые теплоемкости смеси при постоянном объеме  $c_v$  и при постоянном давлении  $c_p$  рассчитываются по следующим уравнениям  $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\right)$ :

$$c_v = \sum_{i=1}^{i=n} g_i \frac{\mu c_{vi}}{\mu_i} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu c_{vi} \quad \text{и} \quad c_p = \sum_{i=1}^{i=n} g_i \frac{\mu c_{pi}}{\mu_i} = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu c_{pi},$$

где  $\mu c_{vi}$  и  $\mu c_{pi}$  - молярные теплоемкости компонентов смеси  $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}\right)$ ; (принимаются постоянными, зависящими только от атомности газов, и выбираются из табл. 1.2). Показатель адиабаты  $k = \frac{c_p}{c_v}$ .

Таблица 1.2

## Теплоемкость газов

Атомность газа	$\mu c_v$ , кДж/(кмоль · К)	$\mu c_p$ , кДж/(кмоль · К)
Одноатомный	12,5	20,8
Двухатомный	20,8	29,1
Трехатомный	29,1	37,4

## 2.2. Определение параметров рабочего тела

Рассчитываются следующие параметры состояния рабочего тела во всех точках цикла: давление  $p$ , удельный объем  $v$ , температура  $T$  и энтропия  $s$ . Например, в точке  $a$  давление и температура известны ( $p_a$  и  $T_a$ ), следовательно:

$$v_a = \frac{RT_a}{p_a},$$

$$\Delta s = s_a - s_0 = c_v \ln \frac{T_a}{T_0} + R \ln \frac{v_a}{v_0}.$$

Полагаем для практического удобства, что численная величина удельной энтропии  $s_0$  в состоянии, соответствующим нормальным физическим условиям, равна нулю. Тогда :

$$\Delta s = s_a = c_v \ln \frac{T_a}{273} + R \ln \frac{v_a \mu}{22,414}.$$

В точке  $c \rightarrow p_c = p_a \varepsilon^k$ ,  $v_c = \frac{v_a}{\varepsilon}$ ,  $T_c = T_a \varepsilon^{k-1}$ ,  $s_c = s_a$  и т.д.

Результаты расчетов сводятся в табл. 1.3 и используются в дальнейшем для построения цикла в координатах  $p - v$  и  $T - s$ .

Таблица 1.3

## Параметры рабочего тела

Параметры рабочего тела	Единицы измерения	Точки цикла				
		a	c	z	z'	b
$p$	Па					
$v$	м <sup>3</sup> /кг					
$T$	К					
$s$	кДж/(кг · К)					

### 2.3. Расчет процессов цикла

Определяются следующие характеристики процессов: теплоемкость  $c$ , изменение внутренней энергии  $\Delta u$ , изменение энтальпии  $\Delta h$ , количество подведенной или отведенной теплоты  $q$ , работа расширения или сжатия  $l$ . Для расчета используются соответствующие каждому процессу уравнения термодинамики. Например, для процесса адиабатного сжатия  $a - c$ :

$$c = 0, \quad \Delta u = u_c - u_a = c_v(T_c - T_a), \quad \Delta h = h_c - h_a = c_p(T_c - T_a), \\ l = \frac{R}{k-1}(T_c - T_a), \quad q = 0;$$

для процесса подвода тепла по изохоре  $c - z'$ :

$$c = c_v, \quad \Delta u = u'_z - u_c = c_v(T'_z - T_c), \quad \Delta h = h'_z - h_c = c_p(T'_z - T_c), \\ l = 0, \quad q = c_v(T'_z - T_c);$$

для процесса подвода теплоты по изобаре  $z' - z$ :

$$c = c_p, \quad \Delta u = u_z - u'_z = c_v(T_z - T'_z), \quad \Delta h = h_z - h'_z = c_p(T_z - T'_z), \\ l = p_c(v_z - v'_z), \quad q = c_p(T_z - T'_z).$$

Аналогично рассчитываются характеристики остальных процессов цикла. Результаты сводятся в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Характеристики процессов	Единицы измерения	Процессы цикла				
		a	c	z	z	b
$c$	кДж/(кг·К)					
$\Delta u$	кДж/кг					
$\Delta h$	кДж/кг					
$q$	кДж/кг					
$l$	кДж/кг					



## Характеристики процессов цикла

### 2.4. Расчет характеристик цикла

Определяются следующие характеристики цикла: количество подведенной теплоты  $q_1$ , количество отведенной теплоты  $q_2$ , количество теплоты  $q_0$ , превращенной в полезную работу, работа расширения  $l_p$ , работа сжатия  $l_{сж}$ , полезная работа  $l_0$ , термический КПД  $\eta_t$ , среднее давление  $p_t$ .

Расчеты выполняются по следующим формулам:

$$q_1 = q_1' + q_1'', \quad q_2 = q_{b-a}, \quad q_0 = q_1 - q_2,$$

$$l_p = l_{z'-z} + l_{z-b}, \quad l_{сж} = l_{a-c}, \quad l_0 = l_p - l_{сж},$$

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1}, \quad p_t = \frac{l_0}{v_a - v_c}.$$

В заключении, чтобы убедиться в отсутствии расчетных ошибок, следует вычислить значение термического КПД цикла по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}. \quad (*)$$

Результаты расчетов свести в табл.1.5.

Таблица 1.5

### Характеристики цикла

Характеристики цикла								
Единицы измерения	<i>кДж/кг</i>							
Результаты расчетов								

### 2.5. Исследование цикла

Исследование цикла заключается в оценке влияния на термический КПД цикла  $\eta_t$  степени сжатия  $\varepsilon$ , степени повышения давления  $\lambda$ , и степени изобарного расширения  $\rho$ . При этом по формуле (\*) вычисляются значения

$\eta_t$  для  $\varepsilon' = 0,75\varepsilon$  и  $\varepsilon'' = 1,25\varepsilon$  при постоянных (заданных)  $\lambda$  и  $\rho$ . Далее выполняются расчеты  $\eta_t$  для  $\rho' = 0,75\rho$  и  $\rho'' = 1,25\rho$  при постоянных (заданных)  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , а затем для  $\lambda' = 0,75\lambda$  и  $\lambda'' = 1,25\lambda$  при постоянных (заданных)  $\varepsilon$  и  $\rho$ . Результаты расчетов заносятся в табл.1.6.

Таблица 1.6

### Результаты исследования цикла ДВС

Характеристика цикла	Постоянные параметры (из табл.1.1)							
	$\lambda, \rho$		$\varepsilon, \lambda$			$\varepsilon, \rho$		
	Переменные параметры и их значения							
$\eta_t, \%$				$\rho''$				

### 2.6. Оформление работы

По данным табл.1.3 строится график цикла в координатах  $p - v$  и  $T - s$  (с соблюдением масштабов); по данным табл.1.6 – три графика зависимости  $\eta_t$  соответственно от  $\varepsilon$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  (с соблюдением масштабов). Все расчеты проводить в системе СИ.

### Контрольная работа № 2

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ (ПСУ)

За основной цикл паросиловой установки принят идеальный цикл Ренкина. В этом цикле осуществляется полная конденсация рабочего тела (пара) в конденсаторе. В цикле Ренкина может использоваться перегретый пар.

### 1.Задание

1.1. Рассчитать и построить цикл паросиловой установки (цикл Ренкина (рис. 2.1). Цикл включает в себя адиабатный процесс 1-2 расширения перегретого пара в турбине, изобарно - изотермический процесс 2-2' отвода теплоты в конденсаторе, изохорный процесс 2'-3 повышения давления воды питательным насосом, изобарный процесс 3-4 подогрева воды в подогревателе воды до температуры кипения в котле, изобарно - изотермический процесс 4-5 подвода теп-

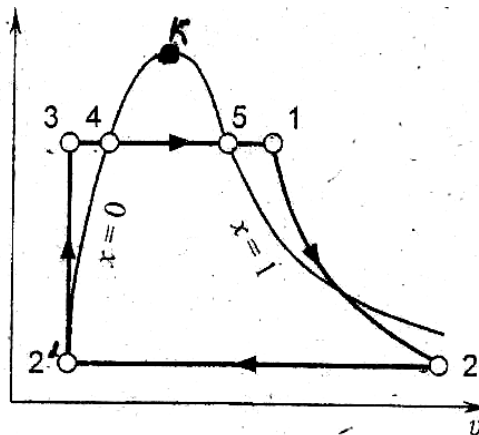


Рис. 2.1. Цикл Ренкина

лоты и парообразования в котле, изобарный процесс 5-1 получения перегретого ненасыщенного пара в пароперегревателе.

1.2. Исследовать влияние параметров пара на характеристики цикла.

Построить графики зависимостей  $l_0$ ,  $\eta_t$ ,  $d_0$  и  $x$  в зависимости от  $p_1$ ,  $p_2$  и  $T_1$ . Сделать выводы о способах улучшения характеристик цикла.

1.3. Исходные данные

Исходные данные - начальное давление  $p_1$ , давление конца расширения (давление конденсации)  $p_2$ , температуру перегретого пара  $t_1$  выбрать из табл. 3 приложения в соответствии с порядковым номером в групповом журнале. Выбранные исходные данные записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета цикла ПСУ

№ варианта	$p_1$ , Па	$t_1$ , °C	$p_2$ , Па

2. Методические указания к выполнению расчетов

2.1. Определение параметров в характерных точках цикла

В точке 1 цикла (см. рис. 2.1), соответствующей перегретому пару на входе в турбину, и в точке 2, соответствующей отработавшему (расширившемуся) пару на выходе из турбины, параметры состояния определяются по  $h-s$  диаграмме водяного пара (рис. 2.2). Для этого по начальным параметрам пара  $p_1$  и  $t_1$  на диаграмме находится точка I (рис. 2.3.) и определяются значения удельного объема  $v_1$ , энтальпии  $h_1(i_1)$  и энтропии  $s_1$  перегретого пара. Затем от точки 1 проводится линия 1-2 адиабатного (изоэнтропного) процесса расширения перегретого пара в турбине до пересечения с изобарой, соответствующей заданному конечному давлению  $p_2$  на выходе из турбины. По положению точки 2 определяются численные значения параметров отработавшего пара:  $v_2$ ,  $h_2$ ,  $s_2 = s_1$  и степени сухости  $x_2$ . В точках 2', 3, 4, и 5 (см. рис. 2.1) параметры состояния воды и пара определяются по справочным таблицам воды и водяного пара (табл. 4 приложения).

$h$ , кДж/кг

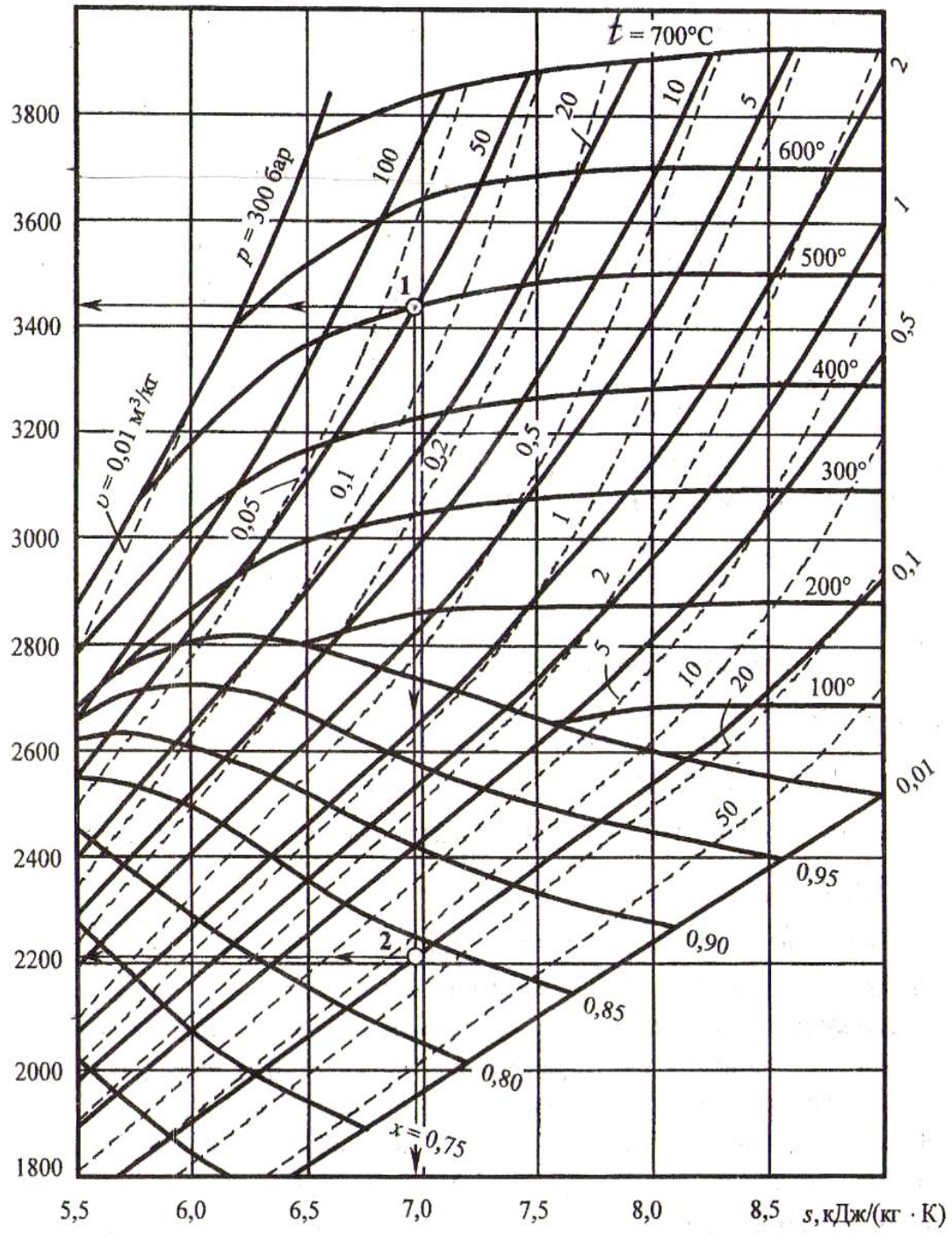


Рис. 2.2.  $h-s$ -диаграмма водяного пара

Рис.2.2

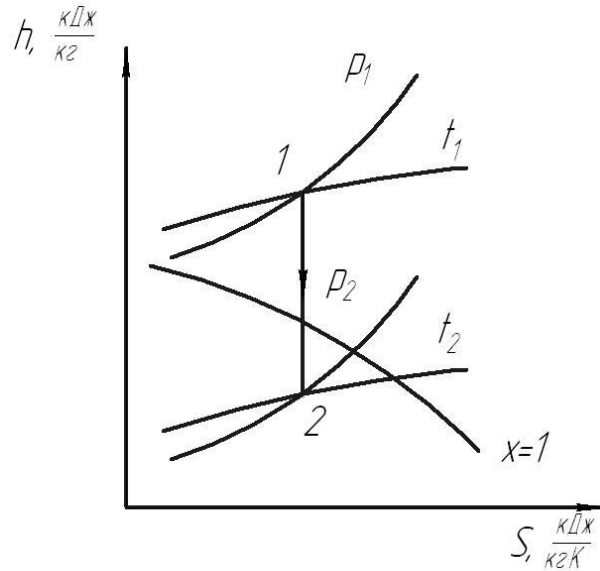


Рис 2.3

При этом учитывается, что жидкая вода в насосе практически не сжимается, поэтому  $v_3 = v_2 = v_2'$  и, соответственно,  $t_3 = t_2 = t_2'$ , а  $s_3 = s_2'$ .

Указанные параметры воды в точках 2' и 3 определяются как функции давления  $p_2$ .

Параметры кипящей воды в точке 4 и сухого насыщенного пара в точке 5 определяются как функции давления  $p_1$ .

Результаты определения параметров состояния воды и пара сводятся в табл. 2.2 и используются для построения в масштабе цикла ПСУ в T-s координатах.

Таблица 2.2

Параметры состояния воды и пара

Обозначение	Единицы измерения	Точки цикла					
p	Па						
t	$^{\circ}\text{C}$						
v	$\text{м}^3/\text{кг}$						
h	кДж/кг						
s	кДж/(кг К)						
x	%						

## 2.2. Расчет характеристик цикл

Рассчитываются следующие характеристики:

полезная работа:

$$l_0 = h_1 - h_2, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

термический КПД:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}};$$

удельный расход пара на единицу работы:  $d_0 = \frac{1}{h_1 - h_2}, \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}$ .

## 2.3. Исследование цикла

Исследовать влияние начального давления перегретого пара  $p_1$ , температуры перегретого пара  $t_1$  и давления конца расширения  $p_2$  на основные показатели цикла:  $l_0$ ,  $\eta_t$ ,  $d_0$  и  $x_2$ . Для этого по изложенной в п. п. 2.1 и 2.2 методике дополнительно рассчитать перечисленные характеристики цикла при  $P_1' = 0,75P_1$  и  $P_1'' = 1,25P_1$  при постоянных (исходных) значениях  $t_1$  и  $P_2$ , Затем провести аналогичные расчеты при  $t_1' = 0,75t_1$  и  $t_1'' = 1,25t_1$  при постоянных значениях  $P_1$  и  $P_2$  и, наконец, определить  $P_2' = 0,75P_2$  и  $P_2'' = 1,25P_2$  при постоянных значениях  $P_1$  и  $t_1$ . Результаты занести в табл. 2.3. Используя полученные данные, построить с соблюдением масштабов графики зависимостей  $l_0$ ,  $\eta_t$ ,  $d_0$ ,  $x_2$  от  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $t_1$ . Сделать выводы по результатам исследования.

Таблица 2.3

Результаты исследования цикла ПСУ

Характеристики цикла	Постоянные параметры ( из табл.2.1)							
	$t_1$ и $P_2$		$P_1$ и $P_2$		$t_1$ и $P_1$			
	Переменные параметры и их значения							
			$t_1'$	$t_1$	$t_1''$		$P_2'$	$P_2''$
$l_0$ , кДж/кг	Па		°С			Па		
$\eta_t$ , %								
$d_0$ , кг/(кДж)								
$x_2$ , %								

Используя полученные данные, построить графики  $l_0$ ,  $\eta_t$ ,  $d_0$ ,  $x_2$  в зависимости от  $p_1$ ,  $t_1$  и  $p_2$  с соблюдением масштабов. Сделать выводы.

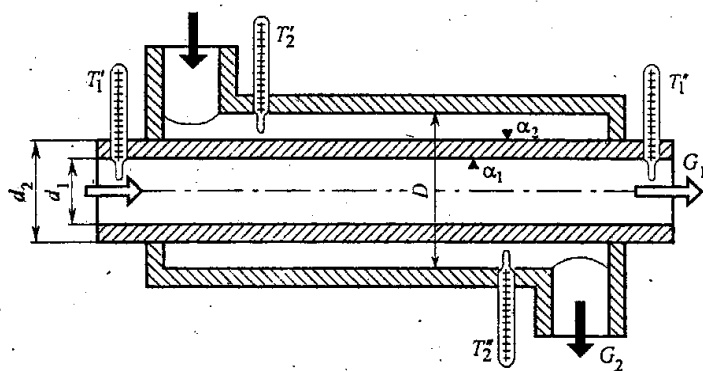
### Контрольная работа № 3

#### РАСЧЕТ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Теплообменным аппаратом (теплообменником) называют устройство, предназначенное для передачи теплоты от одной жидкости (горячего теплоносителя) к другой жидкости (холодному теплоносителю). В работе выполняется расчет рекуперативного теплообменника, в котором горячий и холодный теплоносители разделены стенкой.

#### 1. Задание

1.1. Определить площадь теплопередающей поверхности рекуперативного теплообменника типа "труба в трубе" (рисунок). Расчеты необходимо выполнить для прямоточного и противоточного движения теплоносителей. Потерями теплоты от теплообменника в окружающую среду пренебречь.



Расчетная схема теплообменника

#### 1.2. Исходные данные

Горячий теплоноситель движется по внутренней трубе, его температура на входе равна  $T_1'$ , а расход составляет  $G_1$  кг/с. Холодный теплоноситель движется по кольцевому каналу между трубами и нагревается от температуры  $T_2'$  до  $T_2''$ ; его расход составляет  $G_2$  кг/с. Исходные данные для расчета выбираются из табл. 5 и 6 приложения (по указанию преподавателя). Выбранные исходные данные записываются в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Данные для расчета теплообменника

$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$t_1'$ , °C	$t_2'$ , °C	$t_2''$ , °C	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$D$ , мм	Материал трубок	Теплоноситель

## 2. Методические указания к выполнению расчетов

Для определения площади поверхности нагрева теплообменного аппарата необходимо вычислить его линейный коэффициент теплопередачи  $k_1$ , Вт/(м·К):

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (3.1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей жидкости к стенке трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности внутренней трубы к холодной жидкости, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки внутренней трубы, Вт/(м·К);

Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяют, решая соответствующие критериальные уравнения. Определяемым является критерий Нуссельта:  $N_{у_ж} = \frac{\alpha l}{\lambda_ж}$ ,

где  $l$  – характерный линейный размер, м;  $\lambda_ж$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

В зависимости от решаемой задачи (течение жидкости в трубах, движение жидкости вдоль пластины, поперек или в продольном направлении труб и др.), характера движения жидкости и ряда других факторов критерий Нуссельта может быть выражен как функция критериев Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr) или Рейнольдса (Re).

Общее критериальное уравнение для конвективного теплообмена:

$$N_{у_ж} = c R_{е_ж}^n G_{r_ж}^b P_{r_ж}^m \left( \frac{P_{r_ж}}{P_{r_ст}} \right)^{0,25}.$$

Характер движения жидкости в трубах может быть ламинарным и турбулентным. О режиме течения судят по величине критерия Рейнольдса  $R_{е_ж} = \frac{wd}{\gamma_ж}$ , где  $W$  – средняя скорость движения жидкости, м/с;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м;  $\gamma_ж$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с. Если  $R_{е_ж} < 2320$ , то движение жидкости будет ламинарным. При  $R_{е_ж} = 2,32 \cdot 10^3 \dots 10^4$  режим движения является переходным. При  $R_{е_ж} > 10^4$  в трубе устанавливается развитое турбулентное движение жидкости.

При ламинарном движении жидкости встречаются два режима изотермного движения: вязкостный и вязкостно-гравитационный. Вязкостный



режим соответствует движению жидкости при отсутствии естественной конвекции. Вязкостно-гравитационный режим имеет место тогда, когда вынужденное движение жидкости сопровождается естественной конвекцией. Для того чтобы установить, оказывает ли влияние на теплоотдачу естественная конвекция, требуется вычислить произведение критериев Грасгофа и Прандтля ( $G_{rж} \cdot P_r$ ).

Критерий Грасгофа  $G_{rж} = \frac{g\beta l^3 \Delta T}{\nu_{ж}^2}$ , где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  - коэффициент объемного теплового расширения жидкости, ( $\beta = \frac{1}{T}$ , K<sup>-1</sup>;  $l$  - характерный линейный размер, для горизонтальной трубы равный ее диаметру, м;  $\Delta T$  - температурный напор, равный  $T_{ж} - T_{ст}$ , K.

Физические параметры жидкостей, а также величину критерия  $P_r$  выбирают из табл. 7 приложения в зависимости от средней температуры теплоносителей:

$$T_1 = \frac{T_1' + T_1''}{2} \text{ и } T_2 = \frac{T_2' + T_2''}{2}.$$

$$\text{Температура стенки трубы равна } T_{ст1} = \frac{T_1 + T_2}{2}, \text{ K.}$$

Если  $(G_{rж} \cdot P_r) > 8 \cdot 10^5$ , то естественная конвекция не оказывает существенного влияния на теплоотдачу и режим движения жидкости вязкостный, в противном случае вязкостно - гравитационный.

При вязкостном режиме рекомендуется определять средний коэффициент теплоотдачи в прямых гладких трубах по формуле:

$$N_{u_{ж}} = 0,15 R_{e_{ж}}^{0,33} P_{r_{ж}}^{0,43} \left( \frac{P_{r_{ж}}}{P_{r_{ст}}} \right)^{0,25} \quad (3.2).$$

Для вязкостно-гравитационного режима расчеты среднего коэффициента теплоотдачи в прямых гладких трубах производить по выражению:

$$N_{u_{ж}} = 0,15 R_{e_{ж}}^{0,33} G_{r_{ж}}^{0,1} P_{r_{ж}}^{0,43} \left( \frac{P_{r_{ж}}}{P_{r_{ст}}} \right)^{0,25} \quad (3.3)$$

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном движении рекомендуется следующее уравнение:

$$N_{u_{ж}} = 0,021 R_{e_{ж}}^{0,8} P_{r_{ж}}^{0,43} \left( \frac{P_{r_{ж}}}{P_{r_{ст}}} \right)^{0,25} \quad (3.4).$$

Плотность теплового потока на 1 м трубы:

$$q_l = k_1 \Delta T_{ср} \quad (3.5),$$

где  $\Delta T_{ср}$  - среднелогарифмический температурный напор, K. Для теплообменных аппаратов с прямотоком:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{(T_1' - T_2') - (T_1'' - T_2'')}{\ln \frac{T_1' - T_2''}{T_1'' - T_2'}}, \quad (3.6)$$

а для аппаратов с противотоком:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{(T_1' - T_2'') - (T_1'' - T_2')}{\ln \frac{T_1' - T_2''}{T_1'' - T_2'}}. \quad (3.7)$$

## 2.1. Порядок выполнения расчетов

1. Температуру горячего теплоносителя на выходе из теплообменника определить из уравнения теплового баланса при условии, что потери в окружающую среду отсутствуют. Так как количество теплоты, передаваемой горячим теплоносителем,  $Q = G_2 c_{p_2} (T_2'' - T_2')$ , Вт, то  $T_1'' = T_1' - \frac{Q}{G_1 c_{p_1}}$ , К, где  $c_{p_1}$  и  $c_{p_2}$  - соответственно массовые изобарные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей. Их значения принять постоянными и равными: для воды - 4190, для масла - 2081 Дж/(кг·К).

2. Скорость движения горячего теплоносителя  $W_1$  и холодного  $W_2$  вычислить из выражений  $W_1 = \frac{4G_1}{\rho_1 \pi d_1^2}$  и  $W_2 = \frac{4G_2}{\rho_2 \pi (D^2 - d_2^2)}$ .

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотности теплоносителей в зависимости от температуры, кг/м<sup>3</sup> (табл. 7 приложения).

3. Вычислить значения критерия Рейнольдса  $R_e$  для обеих сред, определив затем характер движения теплоносителя. В случае ламинарного движения определить режим течения (вязкостный или вязкостно-гравитационный). При вычислении критерия  $R_{e_2}$  принять эквивалентный диаметр  $d_{\text{эк}} = D - d_2$ .

4. В соответствии с характером движения жидкости выбрать одно из критериальных уравнений (3.2), (3.3) или (3.4) с целью определения величины критериев Нуссельта  $N_{u_1}$  и  $N_{u_2}$ , характеризующих интенсивность теплообмена на поверхностях внутренней трубы со стороны горячего и холодного теплоносителей. Температуру  $T_{\text{ст}_2}$  принять равной температуре  $T_{\text{ст}_1}$ .

5. По найденным значениям критериев Нуссельта вычислить величины коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

6. Коэффициент теплопередачи  $k_1$  определить по выражению (3.1). Коэффициент теплопроводности материала стенки трубы выбрать по табл.

8 приложения в зависимости от  $T_{ст}$ .

7. Вычислить средние логарифмические температурные напоры для случаев прямотока и противотока по формулам (3.6) и (3.7).

8. Плотность теплового потока определить по формуле (3.5),

9. Длина трубы теплообменника находится как  $l = \frac{Q}{q_1}$ , м.

10. Поверхность нагрева определяется как  $F = \pi d_1 l$ , м<sup>2</sup>.

11. Выполнить анализ результатов расчета для прямоточного и противоточного движений теплоносителей: определить разницу величины поверхностей теплоотдачи для обоих случаев, выразив ее в процентах. Сделать выводы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Исходные данные к контрольной работе № 1

№ п/п	Доли компонентов рабочего тела, %					$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$	$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$	$\rho = \frac{v_4}{v_3}$
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			
1	8,5	5,5	16	70	-	11,0	2,0	1,7
2	9,0	5,0	15	71	-	11,5	1,9	1,6
3	9,5	4,5	14	72	-	12,0	1,5	1,5
4	10,5	4,0	13	73	-	12,5	1,7	1,4
5	10,5	3,5	12	74	-	13,0	1,7	1,3
6	10,0	4,0	11	75	-	13,5	1,5	1,7
7	9,5	4,5	10	76	-	14,0	1,4	1,6
8	9,0	5,0	11	75	-	14,5	1,3	1,5
9	8,5	5,5	12	74	-	15,0	1,2	1,6
10	8,0	6,0	-	73	13	11,0	2,0	2,8
11	7,5	6,5	-	72	14	12,0	1,9	2,7
12	7,0	7,0	-	71	15	13,0	1,8	2,6
13	6,5	7,5	-	70	16	14,0	1,7	2,5
14	6,0	8,0	-	71	15	15,0	1,6	2,4
15	6,5	7,5	-	72	14	16,0	1,5	2,3
16	7,0	7,0	-	73	13	17,0	1,4	2,2
17	7,5	6,5	-	74	12	18,0	1,3	2,1
18	8,0	6,0	-	75	11	19,0	1,2	2,0
19	8,5	6,5	10	75	-	18,5	1,3	2,0
20	9,0	6,0	11	74	-	17,0	1,4	1,9
21	9,5	5,5	12	73	-	17,5	1,4	1,8
22	10,0	5,0	13	72	-	18,0	1,6	1,7
23	10,5	4,5	14	71	-	16,0	1,7	2,0
24	10,5	5,0	15	70	-	15,5	1,8	1,8
25	9,5	5,5	16	69	-	15,0	1,9	1,7
26	9,0	6,0	15	70	-	14,5	2,0	1,6
27	8,5	6,5	14	71	-	14,0	2,1	1,5
28	10,0	5,5	15	70	-	14,0	1,4	1,5
29	8,0	6,0	16	70	-	15,0	1,5	1,8
30	6,0	8,0	20	66	-	16,0	1,5	2,0

Таблица 2

## Характеристики газов

Газ	Химическое обозначение	Молярная масса (округленно), кг/кмоль	Плотность при норм. физ. условиях, кг/м <sup>3</sup>	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Воздух	-	29	1,293	287,0
Азот	N <sub>2</sub>	28	1,251	296,8
Кислород	O <sub>2</sub>	32	1,429	259,8
Водород	H <sub>2</sub>	2	0,089	4124,0
Моноксид углерода	CO	28	1,997	296,9
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44	1,287	188,9
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18	(0,804)	(461,0)

*Примечание:* параметры водяного пара условно приведены к нормальному состоянию.

Таблица 3

## Исходные данные к контрольной работе №2

№ п/п	$p_1$ , бар	$T_1$ , °C	$p_2$ , бар
1	40	400	0,20
2	45	450	0,15
3	50	500	0,10
4	55	550	0,08
5	60	600	0,07
6	65	600	0,06
7	70	600	0,07
8	75	600	0,08
9	80	550	0,09
10	90	550	0,08
11	100	600	0,08
12	90	600	0,08
13	80	500	0,10
14	75	550	0,12
15	70	500	0,10
16	65	500	0,10
17	60	450	0,12
18	55	400	0,15
19	60	400	0,20
20	65	450	0,15
21	70	450	0,10
22	75	500	0,08
23	80	600	0,07
24	85	600	0,08
25	90	500	0,09
26	100	500	0,12
27	110	600	0,08
28	120	500	0,08
29	120	600	0,07
30	130	550	0,06

Таблица 4

## Свойства сухого пара

$p$ , бар	$T_{\text{н}}$ , °С	$\nu'$ , м <sup>3</sup> /кг	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0,04	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,24	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	8,2263
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	6,201	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
0,40	75,87	0,0010264	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,50	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,60	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,80	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	501,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
2,6	128,73	0,0010684	0,6929	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	2163,9	1,6716	6,9922
4,0	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
6,0	158,84	0,0011009	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
8,0	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
10,0	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	793,4	2764,6	1986,2	2,2156	6,5224
14,0	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16,0	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
20,0	212,36	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28,0	230,04	0,0012088	0,07142	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30,0	233,83	0,0012164	0,06663	15,01	1008,4	2803,5	1794,7	2,6455	6,1859
35,0	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
40,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50,0	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
70,0	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90,0	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
100,0	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
110,0	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120,0	324,64	0,0015270	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130,0	330,81	0,0015680	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140,0	330,63	0,0016140	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731

Таблица 5

Исходные данные для расчета теплообменника.

Горячий и холодный теплоносители – вода

Вариант	$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$T_1'$ , К	$T_2'$ , К	$T_2''$ , К	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$D$ , мм	Материал трубок
1	1,00	1,15	353	283	313	32	35	47	Сталь
2	1,04	1,16	354	284	314	32	35	47	Алюминий
3	1,06	1,17	355	285	315	32	35	47	Латунь
4	1,08	1,18	356	286	316	32	35	47	Сталь
5	1,10	1,19	357	287	317	33	36	48	Алюминий
6	1,12	1,2	358	288	318	33	36	48	Латунь
7	1,14	1,21	359	289	319	33	36	48	Сталь
8	1,16	1,22	360	290	320	33	36	48	Алюминий
9	1,18	1,23	361	291	321	34	37	49	Латунь
10	1,20	1,24	362	292	322	34	37	49	Сталь
11	1,22	1,25	363	293	323	34	37	49	Алюминий
12	1,24	1,26	364	294	324	34	37	49	Латунь
13	1,26	1,27	365	295	325	35	38	50	Сталь
14	1,28	1,28	366	296	326	35	38	50	Алюминий
15	1,30	1,29	367	297	327	35	38	50	Латунь
16	1,32	1,3	368	298	328	35	38	50	Сталь
17	1,34	1,31	369	299	329	36	39	51	Алюминий
18	1,36	1,32	370	300	330	36	39	51	Латунь
19	1,38	1,33	371	301	331	36	39	51	Сталь
20	1,40	1,34	372	302	332	36	39	51	Алюминий
21	1,42	1,35	373	303	333	37	40	52	Латунь
22	1,44	1,36	374	304	334	37	40	52	Сталь
23	1,46	1,37	375	305	335	37	40	52	Алюминий
24	1,48	1,38	376	306	336	37	40	52	Латунь
25	1,50	1,39	377	307	337	38	41	53	Сталь
26	1,52	1,4	378	308	338	38	41	53	Алюминий
27	1,54	1,41	379	309	339	38	41	53	Латунь
28	1,56	1,42	380	310	340	38	41	53	Сталь
29	1,58	1,43	381	311	341	39	42	54	Алюминий
30	1,60	1,44	382	312	342	39	42	54	Латунь



Таблица 6

Исходные данные для расчета теплообменника.  
Горячий теплоноситель – масло, холодный – вода

Вариант	$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$T_1'$ , К	$T_2'$ , К	$T_2''$ , К	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$D$ , мм	Материал трубок
1	0,61	1,00	353	283,0	293,0	32	35	47	Сталь
2	0,62	1,02	354	283,5	293,5	32	35	47	Алюминий
3	0,63	1,04	355	284,0	294,0	32	35	47	Латунь
4	0,64	1,06	356	284,5	294,5	32	35	47	Сталь
5	0,65	1,08	357	285,0	295,0	33	36	48	Алюминий
6	0,66	1,10	358	285,5	295,5	33	36	48	Латунь
7	0,67	1,12	359	286,0	296,0	33	36	48	Сталь
8	0,68	1,14	360	286,5	296,5	33	36	48	Алюминий
9	0,69	1,16	361	287,0	297,0	34	37	49	Латунь
10	0,70	1,18	362	288,0	298,0	34	37	49	Сталь
11	0,71	1,20	363	288,5	298,5	34	37	49	Алюминий
12	0,72	1,22	364	289,0	299,0	34	37	49	Латунь
13	0,73	1,24	365	289,5	299,5	35	38	50	Сталь
14	0,74	1,26	366	290,0	300,0	35	38	50	Алюминий
15	0,75	1,28	367	290,5	300,5	35	38	50	Латунь
16	0,76	1,30	368	291,0	301,0	35	38	50	Сталь
17	0,77	1,32	369	291,5	301,5	36	39	51	Алюминий
18	0,78	1,34	370	292,0	302,0	36	39	51	Латунь
19	0,79	1,36	371	292,5	302,5	36	39	51	Сталь
20	0,80	1,38	372	293,0	303,0	36	39	51	Алюминий
21	0,81	1,40	373	293,5	303,5	37	40	52	Латунь
22	0,82	1,42	374	294,0	304,0	37	40	52	Сталь
23	0,83	1,44	375	294,5	304,5	37	40	52	Алюминий
24	0,84	1,46	376	295,0	305,0	37	40	52	Латунь
25	0,85	1,48	377	295,5	305,5	38	41	53	Сталь
26	0,86	1,50	378	296,0	306,0	38	41	53	Алюминий
27	0,87	1,52	379	296,5	306,5	38	41	53	Латунь
28	0,88	1,54	380	297,0	307,0	38	41	53	Сталь
29	0,89	1,56	381	297,5	307,5	39	42	54	Алюминий
30	0,90	1,58	382	298,0	308,0	39	42	54	Латунь

Таблица 7

Физические свойства жидкостей

T, К	Вода				Масло МК			
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
273	999,9	0,580	1,789	13,50	–	–	–	–
283	999,7	0,580	1,306	9,45	911,0	0,1510	3883,0	39000
293	998,2	0,597	1,006	7,03	903,0	0,1485	1514,0	15800
303	995,7	0,612	0,805	5,45	894,5	0,1461	691,2	7450
313	992,2	0,627	0,659	4,36	887,5	0,1437	432,0	3810
323	988,1	0,640	0,556	3,59	879,0	0,1413	186,2	2140
333	983,1	0,650	0,478	3,03	871,5	0,1389	110,6	1320
343	977,8	0,662	0,415	2,58	864,0	0,1363	69,3	858
353	971,8	0,669	0,365	2,28	856,0	0,1340	46,6	591
363	965,3	0,676	0,326	1,97	848,2	0,1314	32,3	424
373	958,4	0,684	0,295	1,75	840,7	0,1290	24,0	327

Таблица 8

Значение коэффициента теплопроводности металлов

T, К	$\lambda$ , Вт/(м·К)		
	Сталь	Алюминий	Латунь
273	63	202	102
373	57	206	117

## Список использованных источников

1. Теплотехника: Учеб. для вузов/ В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. Луканина. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.: ил.
2. Архаров А.М. Теплотехника: Учеб. для студентов вузов / Под общ. ред. В.И. Крутова -М.: Машиностроение, 1986.-432 с.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1980. - 496 с.
4. Афанасьев В.Н, Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / Под ред. В.И, Крутова и Г.Б. Петражицкого. - М.: Высш шк 1986 -383с.
5. Тихомиров К.В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. - М.: Стройиздат, 1984. - 274 с.
6. Исаев С.И. Теория тепломассообмена: Учеб. для энергомашиностроит. спец. вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. - М.: Высш. шк., 1979. -495 с.