

## **Требования к выполнению курсовой работы**

Расчетно-пояснительная записка должна быть написана четко и аккуратно на одной стороне листов писчей бумаги стандартного формата. Листы должны быть с рамками и штампом.

Записка должна быть написана грамотно, без сокращений, с ясно выделенными заголовками. В ней должны быть приведены все требуемые расчеты с четко выполненными схемами. Примерный объем пояснительной записки – 30...35 печатных страниц.

Формулы, используемые в расчете, даются вначале в алгебраической форме, затем следуют пояснения обозначений и размерностей всех входящих в формулу физических величин. После этого подставляются числовые значения физических величин и производятся вычисления.

В тексте записки должны быть ссылки на литературные источники для всех расчетных формул, физических величин и другие данные, взятые из литературы. Ссылки на литературу следует делать в виде заключенного в квадратные скобки номера источника по прилагаемому в конце записки списку использованной литературы. В пояснительную записку следует обязательно включать технологическую схему, расчетные графики и др. Описание технологической схемы должно быть увязано с ее графическим изображением. Материал в пояснительной записке рекомендуется располагать в следующей последовательности:

1. Титульный лист;
2. задание на курсовую работу;
3. Оглавление, содержащие все разделы пояснительной записки с указанием номера страницы;
4. Введение;
5. Состояние вопроса (в виде литературного обзора по теме);
6. Расчеты, отражающие содержание расчетно-пояснительной записки согласно заданию;
7. Заключение, содержащее выводы по выполняемой работе;
8. Список литературы.

**Графическая часть** курсовой работы оформляется на листе формата А3 в масштабе, и включает в себя продольный и поперечный разрезы теплообменника с указанием его основных размеров.

***Курсовая работа, выполненная не по своему индивидуальному заданию, к рассмотрению не принимаются.***

Исходные данные для решения курсовой работы выбираются в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

### Методические рекомендации к решению курсовой работы

Рассчитать кожухотрубчатый теплообменник для нагрева  $m$  (кг/час) жидкости от температуры  $t_{2н}$  (°C) до температуры  $t_{2к}$  (°C). Греющий теплоноситель - водяной пар. Давление пара -  $P_{абс}$  (ат).

В результате расчета определить:

1. Коэффициенты теплопередачи и коэффициент теплопередачи.
2. Поверхность теплообмена.
3. Основные размеры теплообменника.
4. Толщину изоляции и тепловые потери в окружающую среду.
5. Расход греющего пара.

6. Графическая часть курсовой работы оформляется на листе формата А3 в масштабе, и включает в себя продольный и поперечный разрезы теплообменника с указанием его основных размеров.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

#### *Выбор конструктивных элементов и скорости жидкости*

Учитывая условия теплообмена и удобство эксплуатации, жидкость необходимо направить по трубам, а пар - в межтрубное пространство. Скорость движения жидкости в трубах должна обеспечить достаточно интенсивный теплообмен и не вызвать сильного возрастания гидравлических соединений. На основании практических данных рекомендуется принять:

- 1) скорость жидкости  $\omega = 0,6 \div 0,9$  м/с;
- 2) внутренний диаметр трубы  $d_v = 25 \div 40$  мм;
- 3) толщину стенки трубы  $\delta_{ст} = 2,5 \div 4$  мм.

Выбор размеров труб производится по табл. 1 приложения.

Число труб в одном ходу

$$n = \frac{1,27 \cdot m}{d_v^2 \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\omega}, \quad (1)$$

где  $m$  - расход жидкости, кг/с;

$d_v$  - внутренний диаметр трубы, м;

$\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  - скорость жидкости, м/с.

Все физические константы нагреваемой жидкости берут из таблиц в приложении, при определяющей температуре  $t_{опр}$  (°C)

$$t_{опр} = \frac{t_{2н} + t_{2к}}{2}.$$

Общее число труб в пучке (расчетное)

$$n = n_1 \cdot z_{тр}, \quad (2)$$

где  $z_{тр}$  - количество ходов в теплообменнике.

В соответствии с заданной производительностью  $z_{тр}$  принимаются 2; 4; 6.

Располагая трубы по периметрам шестиугольников, выбирают из табл. 2 приложения ближайшее значение  $n$  и, уточняя  $n_1$  из уравнения (2), пересчитывают скорость движения жидкости по уравнению (1). Скорость жидкости должна быть в пределах  $0,6 \div 0,9$  м/с. Если  $\omega < 0,6$  м/с или  $\omega > 0,9$  м/с, то выбирают новое значение общего числа труб из табл. 2 приложения, уточняют число труб в одном ходу и уточняют скорость.

1. Определение среднего температурного набора

Средняя разность температур между паром и нагреваемой жидкостью (температурный напор) определяется как среднелогарифмическое из значений наибольшей и наименьшей разностей температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\bar{\theta}}}{\Delta t_m}} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\theta}}}{\Delta t_m}}, \quad (3)$$

где  $\Delta t_{\bar{\theta}} = t_s - t_{2n}$ , град;

$\Delta t_m = t_s - t_{2k}$ , град;

$t_s$  - температура пара, °C.

Если отношение  $\Delta t_{\bar{\theta}} / \Delta t_m \leq 2$ , то с достаточной точностью можно пользоваться среднеарифметическим значением:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} + \Delta t_m}{2}. \quad (4)$$

## 2. Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости

В целях определения режима движения жидкости в трубах, вычисляется критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{э}}}{\nu} = \frac{\omega \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{э}} = d_{\text{в}}$  - эквивалентный диаметр, м;

$\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$\mu$  - динамическая вязкость, Па·с.

Пересчет динамической вязкости  $\mu$ , выраженной в сантипуазах (СПЗ), в кинематическую производится по формуле:

$$\nu = \frac{\mu}{1000 \cdot \rho}. \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется по следующим критериальным уравнениям:

а) для турбулентного режима ( $Re > 10\,000$ )

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (7)$$

б) для переходного режима ( $Re = 2300 \div 10\,000$ )

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}, \quad (8)$$

в) для ламинарного режима ( $Re < 2300$ )

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1}, \quad (9)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{d_{\text{э}} \alpha_2}{\lambda_2}; \quad (10)$$

$Pr$  - критерий Прандтля

$$Pr = \frac{c \mu}{\lambda} = \frac{c \nu \rho}{\lambda}; \quad (11)$$

$Gr$  - критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{gd_s^3}{\nu^2} \cdot \Delta t_2 \cdot \beta, \quad (12)$$

где  $\Delta t_2$  - разность температур стенки и продукта:  $\Delta t_2 = t_{cm} - t_{onp}$ ;

$c$  - удельная теплоемкость, Дж/(кг·°K);

$\mu$  - динамическая вязкость, Па·с;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°K);

$\beta$  - коэффициент объемного расширения жидкости.

Температуру стенки рассчитывают как среднеарифметическую величину:

$$t_{cm} = \frac{t_s + t_{конд} + t_{2н} + t_{2к}}{4}. \quad (13)$$

Можно принять  $t_{конд} = t_s$  (°C).

Определив критерии Re, Pr, Gr, из критериального уравнения находят значение критерия Nu, а затем вычисляют коэффициент теплоотдачи из формулы:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_s}. \quad (14)$$

### 3. Определение коэффициента теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_1$

В случае конденсации водяного пара на пучке  $n$  вертикальных труб высотой  $H$ , диаметром  $d_n$  среднее значение коэффициента теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>·°K)) определяют по формуле:

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r}{H \cdot \mu \cdot \Delta t_1}}. \quad (15)$$

В случае конденсации водяного пара на поверхности пучка горизонтальных труб среднее значение коэффициента теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>·°K)) рассчитывают по формуле:

$$\alpha_1 = 1,28 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r}{d_n \cdot \mu \cdot \Delta t_1}}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  - теплопроводность пленки конденсата, Вт/(м·°K);

$\rho$  - плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$r$  - удельная теплота конденсата, Дж/кг (см. табл. 30 приложения);

$\mu$  - динамическая вязкость конденсата, Па·с;

$H$  - рабочая высота вертикальной трубы, м;

$\Delta t$  - разность температур пара и стенки, °C;

$d_n$  - наружный диаметр труб, м;

$\varepsilon$  - коэффициент, зависящий от числа труб в вертикальном ряду (см. табл. 2 приложения).

Все физические константы пленки конденсата (воды) берут из табл. 3 приложения при определяющей температуре пара  $t_s$ . Рабочую высоту вертикальной трубы принимают в пределах 2-6 м.

### 4. Определение коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи (Вт/м<sup>2</sup>·°K) для труб (цилиндрических стенок), если  $d_n/d_b \leq 2$ , можно определить по формуле для плоских стенок:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + r_{cm}}, \quad (17)$$

где  $r_{cm}$  - термическое сопротивление загрязненной стенки, м<sup>2</sup>·°K/Вт.

$$r_{cm} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}, \quad (18)$$

где  $\delta_{cm}$ ,  $\delta_{загр}$  - толщина металлической стенки трубы и слоя загрязнения, м ( $\delta_{загр}$  принимают 0,5÷1,5 мм);

$\lambda_{cm}$ ,  $\lambda_{загр}$  - коэффициенты теплопроводности металлической стенки и слоя загрязнения, Вт/(м·°К) ( $\lambda_{загр}$  принимается из табл. 22 приложения для накипи;  $\lambda_{cm}$  принимается из табл. 22 приложения).

#### 5. Определение поверхности теплообмена и основных размеров теплообменника

Поверхность теплообмена определяется из уравнения:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (19)$$

где  $Q$  - тепловая нагрузка, Вт.

$$Q = m \cdot c \cdot (t_{2к} - t_{2н}), \quad (20)$$

где  $c$  - удельная теплоемкость нагреваемой жидкости, Дж/(кг·°К).

Для определения длины труб (м) пользуются соотношением:

$$H(l) = \frac{F}{\pi \cdot d_p \cdot n}, \quad (21)$$

где  $n$  - общее количество труб в пучке;

$d_p$  - расчетный диаметр, м.

В качестве расчетного диаметра принимают:

При	$\alpha_1 > \alpha_2$	$d_p = d_{вн}$
При	$\alpha_1 \approx \alpha_2$	$d_p = 0,5(d_{вн} + d_{н})$
При	$\alpha_1 < \alpha_2$	$d_p = d_{н}$

Диаметр кожуха

$$D_k = t(v - 1) + 4d_n, \quad (22)$$

где  $v$  - число труб по диагонали шестиугольника (см. табл. 2 приложения);

$t = (1,3 \div 1,4) \cdot d_n$  - шаг труб, м.

#### 6. Расчет изоляции и тепловых потерь в окружающую среду

Толщина изоляционного слоя (м) определяется из уравнения:  $\delta_{из} = \lambda_{из} \left( \frac{1}{K_n} - \frac{1}{\alpha_n} \right),$   
(23)

где  $\lambda_{из}$  - коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(м·°К) (см. табл. 22 приложения);

$K_n$  - коэффициент теплопередачи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°К).

$$K_n = \alpha_n \frac{t_{из} - t_{воз}}{t_s - t_{воз}}, \quad (24)$$

где  $\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·°К)

$$\alpha_n = 9,3 + 0,06 \cdot t_{из}; \quad (25)$$

$t_{из} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  - допустимая температура поверхности изоляции,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{воз} = 15 \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  - температура окружающего воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Потери тепла в окружающую среду (Вт) определяются по формуле:

$$Q_{пот} = K_n \cdot F_n (t_s - t_{воз}), \quad (26)$$

где  $F_n$  - наружная поверхность теплообменника,  $\text{м}^2$ .

$$F_n \approx \pi D_k H + \pi D_k^2 / 2$$

7. Определение расхода греющего пара (кг/с)

$$D = \frac{Q + Q_{nom}}{i'' - i'}, \quad (27)$$

где  $i''$ ,  $i'$  - энтальпии пара и конденсата, Дж/кг (берутся из табл. 30 приложения по заданному давлению).

Таблица Варианты заданий

№	Расположение теплообменника		Нагреваемая жидкость	m, кг/ч	t <sub>2н</sub> (°C)	t <sub>2к</sub> (°C)	P <sub>абс</sub> , ат
	2Б81	2Б82					
1	Горизонтальное	Вертикальное	Трансформаторное масло	17000	25	85	1,4
2				22000	23	87	1,9
3				18000	26	84	1,5
4				14000	30	90	1,8
5				21000	27	83	1,3
6				22000	24	84	1,6
7				15000	28	82	1,7
8				26000	27	83	1,8
9			Масло МС-20	28000	23	87	2,2
10				33000	30	80	2,6
11				27000	25	85	2,3
12				26000	26	84	2,8
13				29000	23	87	2
14				25000	27	83	1,4
15				29000	18	82	1,7
16				25000	22	98	2,1
17			Масло МК	26000	24	86	1,3
18				33000	21	89	1,8
19				31000	19	81	2
20				29000	25	85	1,5
21				23000	28	82	2,2
22				27000	20	90	2,4
23				25000	29	91	1,6
24				36000	26	84	2,3
25				30000	21	89	2

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.—М.: Энергоиздат, 1981.—416 с.
2. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче.—М.: Энергия, 1980.—288 с.
3. Справочник по теплообменникам, т. 2 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др.—М.: Энергоатомиздат, 1987.—352 с.
4. Бакластов А.М. Промышленные тепломассообменные процессы и установки /А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.—М.: Энергоатомиздат, 1986.—328 с



## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Трубы стальные бесшовные горячекатаные (ГОСТ 8732-58)



Наружный диаметр $d_{\text{н}}$ , мм	Толщина стенки, мм		Наружный диаметр	Толщина стенки, мм	
	от	до		от	до
25	2,5	8	63,6	3	14
28	2,5	8	68	3	16
32	2,5	8	70	3	16
38	2,5	8	73	3	19
42	2,5	10	76	3	19
45	2,5	10	83	3,5	19
50	2,5	10	89	3,5	24
54	3	11	95	3,5	24
57	3	13	102	3,5	24
60	3	14	108	4	28

Таблица 2 <sup>□</sup>

Число труб, размещаемых в трубной доске по шестиугольникам

Число труб по диагонал ям 6-уголь ника	Число труб в пучке без учета сегмен та	Обще е число труб в пучке	$\varepsilon$	Число труб по диагонал ям 6-уголь ника	Число труб в пучке без учета сегмен та	Обще е число труб в пучке	$\varepsilon$
3	7	7	0,9 0	23	397	439	0,5 4
5	19	19	0,8 0	25	469	517	0,5 3
7	37	37	0,7 2	27	547	613	0,5 2
9	61	61	0,6 8	29	631	721	0,5 1
11	91	91	0,6 5	31	721	823	0,5 1
13	127	127	0,6 2	33	817	931	0,5 0
15	169	187	0,60	35	919	1045	0,49
17	217	241	0,58	37	1027	1165	0,48
19	271	301	0,57	39	1141	1303	0,47
21	331	367	0,56	41	1261	1459	0,47

Таблица 3

## Физические свойства трансформаторного масла

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/кг} \cdot \text{K}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, 1/\text{K}$	$\text{Pr}$
0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,5	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,9	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1008	128,5	14,7	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	7,03	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,80	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,20	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9

Таблица 4

## Физические свойства масла МС – 20

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/кг} \cdot \text{K}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$\text{Pr}$
-10	990,3	1,951	0,136	-	-	7,75	6,24	-
0	903,6	1,980	0,135	-	-	7,58	6,27	-
10	897,9	2,010	0,135	-	-	7,44	6,31	-
20	892,3	2,043	0,134	10026	1125	7,30	6,35	15400
30	886,6	2,072	0,132	4670	526	7,19	6,38	7310
40	881,0	2,106	0,131	2433	276	7,08	6,42	3890
50	875,3	2,135	0,130	1334	153	7,00	6,46	2180
60	869,6	2,165	0,129	798,5	91,9	6,86	6,51	1340
70	864,0	2,198	0,128	498,3	58,4	6,75	6,55	865
80	858,3	2,227	0,127	336,5	39,2	6,67	6,60	588
90	852,7	2,261	0,126	234,4	27,5	6,56	6,64	420
100	847,0	2,290	0,126	171,7	20,3	6,44	6,69	315
110	841,3	2,320	0,124	132,4	15,7	6,36	6,73	247
120	835,7	2,353	0,123	101,0	12,1	6,25	6,77	193
130	830,0	2,382	0,122	79,76	9,61	6,17	6,82	156
140	824,4	2,420	0,121	61,80	7,50	6,08	6,87	123
150	818,7	2,445	0,120	53,17	6,50	6,00	6,92	108

## Физические свойства масла МК

t, С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/кг·К	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
10	911,0	1,645	0,1510	35414	3883	9,94	8,56	39000
20	903,0	1,712	0,1485	18560	1514	9,58	8,64	15800
30	894,5	1,758	0,1461	6180	691,2	9,28	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	3031	342,0	8,97	8,79	3810
50	879,0	1,851	0,1413	1638	186,2	8,69	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	961,4	110,6	8,39	8,95	1320
70	864,0	1,943	0,1363	603,3	69,3	8,14	9,03	858
80	856,0	1,989	0,1340	399,3	46,6	7,89	9,12	591
90	848,2	2,035	0,1314	273,7	32,3	7,61	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	202,1	24,0	7,33	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	145,2	17,4	7,11	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	110,4	13,4	6,92	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	87,31	10,7	6,69	9,54	160
140	809,2	2,265	0,1188	70,34	8,70	6,53	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	56,90	7,10	6,25	9,73	113,5