

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета
Дата подписания: 25.08.2023 12:46:04
Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине «Тепло- и хладотехника»
для студентов направления подготовки
19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания
Направленность (профиль) Технология и организация ресторанного дела

Пятигорск, 2022

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

Введение

Практическая работа № 1. Нагревание

Практическая работа № 2. Построение цикла и расчет одноступенчатой холодильной машины

Список рекомендуемой литературы

Введение

Изучение дисциплины рекомендуется вести в следующем порядке: внимательно ознакомиться с содержанием соответствующего раздела рабочей программы и методическими указаниями, прочитать по учебнику материал, рекомендуемый в программе для изучения данной темы.

При изучении материала полезно составлять конспекты по каждой теме изучаемой дисциплины.

Для положительной аттестации по дисциплине от студента требуется знание теоретических положений дисциплин, понимание физической сущности изучаемых явлений и процессов, умение применять теоретические положения к решению практических задач.

В результате освоения компетенций ОПК-2, ОПК-3, ПК-5 студент должен знать понятия: Термодинамическая система. Термические параметры. Состояние системы. Первый закон термодинамики. Второй закон термодинамики. Идеальный газ как рабочее тело. Газовые смеси. Теплоемкость газов. Зависимость теплоемкости от температуры. Понятие термодинамического процесса. Уравнения и параметры потока газа. Течение газа в каналах. Терминология теплообмена. Основной закон теплопроводности. Теплопроводность плоской однослойной стенки. Основной закон теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи. Основы теории теплового подобия. Лучистый теплообмен. Закономерности лучистого теплообмена. Лучистый теплообмен между телами, разделенными прозрачной средой. Теплопередача. Уравнение теплопередачи. Теплопередача через плоскую стенку. Пути интенсификации теплопередачи. Принципы охлаждения. Способы понижения температуры рабочего тела. Дросселирование. Адиабатное расширение. Вихревой эффект охлаждения. Хладагенты и их свойства. Фазовые переходы хладагентов, их диаграммы состояния. Хладоносители. Цикл воздушной холодильной машины. Цикл паровой компрессорной холодильной машины. Цикл абсорбционной холодильной машины. Цикл теплового насоса.

Дисциплина «Тепло- и хладотехника» входит в обязательную часть дисциплин подготовки бакалавра по направлению 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, направленности (профиля) Технология и организация ресторанного дела заочной формы обучения. Ее освоение происходит в 4 семестре.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. НАГРЕВАНИЕ

1.1. Расчет кожухотрубчатого теплообменника.

Рассчитать горизонтальный кожухотрубчатый теплообменник, в трубном пространстве которого при давлении P_1 движется теплоноситель «1» со средней скоростью ω_1 . Теплоноситель «1» охлаждается (нагревается) от начальной температуры t_{H1} до конечной t_{K1} . В межтрубное пространство теплообменника подается теплоноситель «2» при давлении P_2 . Температура теплоносителя «2» изменяется от начальной t_{H2} до конечной t_{K1} . Трубы в теплообменнике стальные с незначительной коррозией, расположение труб шахматное.

Геометрические размеры теплообменника:

диаметр кожуха D , мм;

диаметр труб $d \times \delta$, мм,

общее число труб n ;

длина труб L , м;

число ходов в трубном пространстве Z ;

площадь поверхности теплообмена F , м².

В вариантах 1-15, 29-35 заданием предусматривается наличие поперечных перегородок в межтрубном пространстве теплообменника. Площадь проходного сечения в вырезе перегородки $S_{\text{ПЕР}}$ составляет 25% от площади сечения межтрубного пространства S_2 . В вариантах 16 - 28 контрольного задания теплообменники не имеют поперечных перегородок в межтрубном пространстве.

Требуется определить:

среднюю разность температур между теплоносителями;

среднюю температуру каждого теплоносителя;

теплофизические свойства теплоносителей при их средних температурах;

массовый и объемный расход теплоносителя «1»;

тепловую нагрузку аппарата;

массовый и объемный расход теплоносителя «2»;

среднюю скорость теплоносителя «2»;

значение критерия Рейнольдса и режим движения каждого теплоносителя;

расчётные коэффициенты теплоотдачи со стороны каждого теплоносителя;

расчётный коэффициент теплопередачи без учёта загрязнений стенки;

расчётный коэффициент теплопередачи с учётом загрязнений стенки;

температуру стенки со стороны каждого теплоносителя;

уточнённый коэффициент теплопередачи;

диаметры штуцеров для подачи теплоносителей (принимая допустимые скорости движения теплоносителя по трубам). Подобрать штуцера, исходя из ряда условных диаметров D_y : 20, 25, 32, 40, 50, 70, 80, 100, 125, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 мм;

гидравлическое сопротивление трубного и межтрубного пространства для изотермического потока, а также число перегородок в межтрубном пространстве, если их наличие в теплообменнике предусмотрено заданием;

необходимую площадь поверхности теплообмена.

Задания взять из таблицы 1.1 и 1.2 по последним двум цифрам зачетной книжки.

Сделать вывод о том, достаточна ли площадь поверхности теплообменника с заданными геометрическими характеристиками для проведения процесса в определенном заданием температурном интервале.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Таблица 1.1.

	Трубное пространство теплообменника					Межтрубное
	теплоноситель «1»	P_1 , МПа	t_{H1} , °C	t_{K1} , °C	ω_1 , м/с	теплоноситель «2»
1	Аммиак (газ)	0,30	100	5	6,0	22,4%-ный раствор NaCl
2	Аммиак (газ)	0,30	90	30	8,0	Вода
3	Аммиак (газ)	0,50	20	70	13,0	Водяной конденсат
4	Азот	0,15	20	100	10,0	Водяной конденсат
5	Азот	0,15	100	20	9,0	Вода
6	Вода	0,60	20	35	0,05	Азот
7	Водяной конденсат		180	100	0,02	Воздух
8	15%-ный раствор NaCl	0,20	10	5	0,03	Воздух
9	Вода	0,60	25	40	0,01	Воздух
10	Вода	0,60	20	30	0,04	Этан
11	Воздух	0,20	300	200	10,0	Этан
12	Этан	0,40	60	250	6,0	Этилен
13	Этилен	0,20	60	5	10,0	24,7%-ный раствор CaCl ₂
14	Этилен	0,20	60	5	5,0	24,7%-ный раствор CaCl ₂
15	Этилен	0,80	100	50	4,0	Вода
16	Анилин	0,20	180	60	0,6	Вода
17	Ацетон	0,20	56	40	0,5	Вода
18	Бензол	0,20	80	60	0,4	Вода
19	Бутиловый спирт	0,15	117	40	0,9	Вода
20	Метиловый спирт	0,15	64	38	1,0	Вода
21	Октан	0,17	136	45	0,6	Вода
22	Сероуглерод	0,12	46	25	0,6	Вода
23	Толуол	0,15	110	70	0,5	Вода
24	Четыреххлористый углерод	0,12	76	42	0,4	Вода
25	Этиловый спирт	0,15	78	38	0,5	Вода
26	Гексан	0,20	70	40	0,7	Вода
27	Анилин	0,15	180	75	0,6	Вода
28	Ацетон	0,20	50	38	0,8	Вода
29	Бензол	0,18	80	50	0,7	Вода
30	Бутиловый спирт	0,20	117	60	0,8	Вода
31	Метиловый спирт	0,16	64	40	0,8	Вода
32	Октан	0,18	130	80	0,7	Вода
33	Сероуглерод	0,20	46	28	0,7	Вода
34	Толуол	0,21	110	80	0,4	Вода
35	Этиловый спирт	0,23	78	45	0,4	Вода

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Таблица 1.2

№	Пространство теплообменника			Геометрические размеры теплообменника					
	P_2 , МПа	t_{H2} , °C	t_{K2} , °C	D, мм	$d \times \delta$, мм	n	L, м	Z	F, м ²
1	0,20	-15	-5	500	20 × 2	202	3,0	2	38,0
2	0,60	7	20	600	20 × 2	370	2,0	2	47,0
3	0,20	110	60	600	20 × 2	389	2,0	1	49,0
4	0,50	150	120	400	20 × 2	166	4,0	2	42,0
5	0,60	20	40	400	25 × 2	111	3,0	1	26,0
6	0,12	80	50	325	20 × 2	100	1,5	1	9,5
7	0,12	20	120	400	25 × 2	100	4,0	2	31,0
8	0,12	70	25	273	25 × 2	37	1,0	1	3,0
9	0,40	150	60	600	20 × 2	389	2,0	1	49,0
10	0,20	90	30	273	20 × 2	61	2,0	1	7,5
11	0,15	50	180	400	25 × 2	100	4,0	2	31,0
12	0,40	300	100	600	25 × 2	257	4,0	1	81,0
13	0,20	-20	0	800	25 × 2	404	2,0	4	63,0
14	0,20	-20	-10	400	20 × 2	156	2,0	2	21,0
15	0,60	25	40	500	25 × 2	132	6,0	2	62,0
16	0,12	25	40	1200	25 × 2	1090	6,0	2	59
17	0,15	25	40	1200	25 × 2	1090	4,0	2	338
18	0,18	20	40	1000	25 × 2	754	6,0	2	353
19	0,18	25	35	1000	25 × 2	754	4,0	2	234
20	0,20	25	40	1000	25 × 2	754	3,0	2	175
21	0,15	20	36	800	25 × 2	450	6,0	2	212
22	0,22	10	25	600	25 × 2	244	6,0	2	114
23	0,17	25	40	600	25 × 2	244	3,0	2	57
24	0,15	24	35	400	25 × 2	100	4,0	2	31
25	0,20	24	35	400	25 × 2	100	2,0	2	15
26	0,20	21	35	325	25 × 2	52	1,5	2	6,0
27	0,18	25	35	1000	25 × 2	702	3,0	2	163
28	0,20	24	35	800	25 × 2	408	4,0	2	128
29	0,21	25	35	1200	25 × 2	1028	6,0	4	479
30	0,19	23	40	1200	25 × 2	1028	4,0	4	479
31	0,17	20	35	1000	25 × 2	702	6,0	4	329
32	0,20	25	40	1000	25 × 2	702	4,0	4	218
33	0,18	18	26	800	25 × 2	408	4,0	4	20
34	0,19	25	40	800	25 × 2	408	3,0	4	20
35	0,20	25	40	800	25 × 2	210	4,0	4	14

Примечание. Теплофизические свойства некоторых веществ приведены в приложении.

1.2. Пример расчета.

Рассчитать горизонтальный кожухотрубчатый теплообменник (рис. 1.2.) при следующих условиях:

теплоноситель «1» - метиловый спирт ($P_1 = 0,098$ МПа

(~ 1 кгс/см²), $t_{H1} = 60^\circ\text{C}$, $t_{K1} = 40^\circ\text{C}$);

теплоноситель «2» - вода ($P_2 = 0,196$ МПа (~ 2 кгс/см²);

$t_{H2} = 25^\circ\text{C}$, $t_{K2} = 35^\circ\text{C}$).

Сертификат:

12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец:

Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

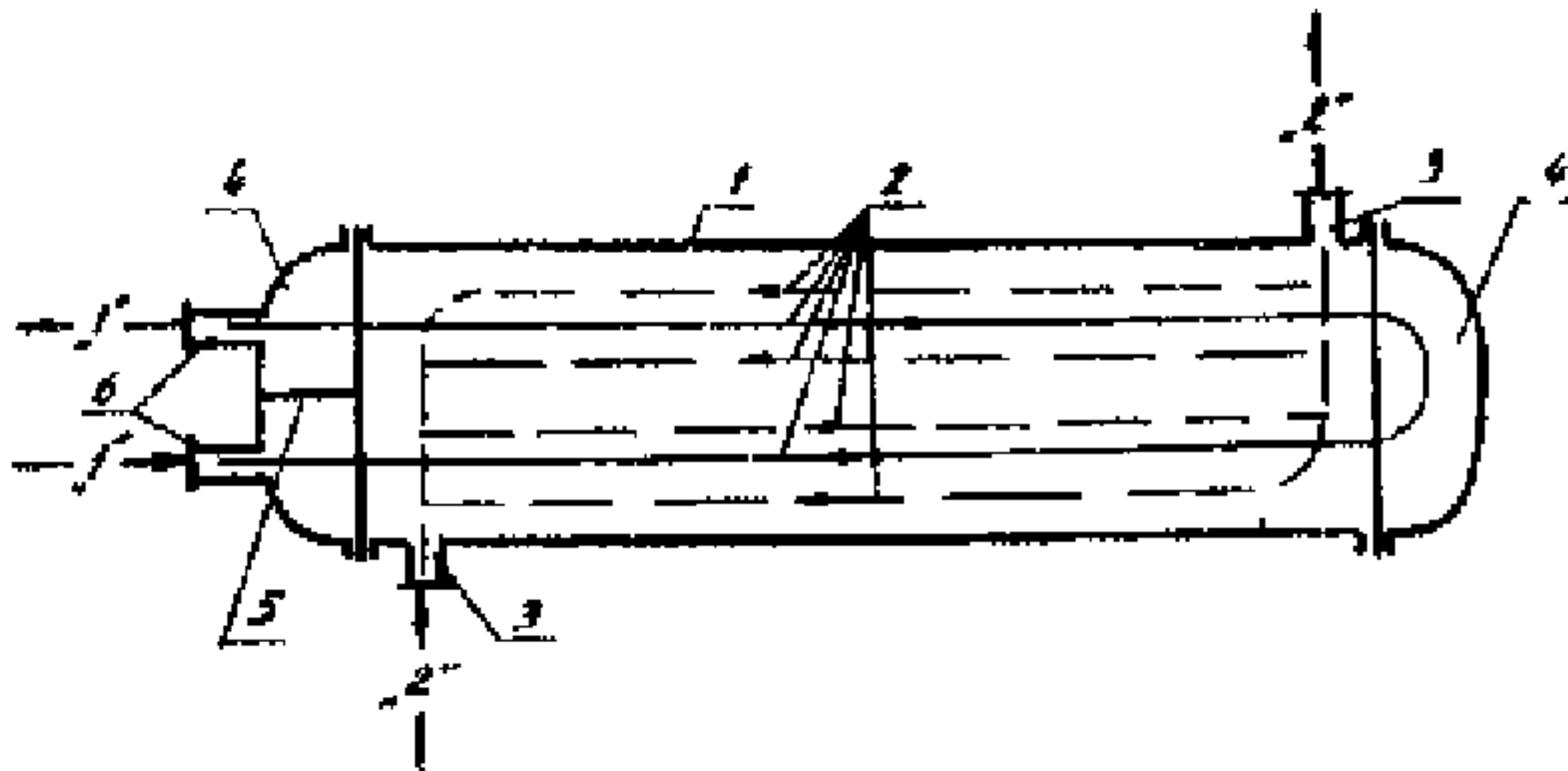


Рис.1.2. Схема двухходового горизонтального кожухотрубчатого теплообменника:
1 - корпус, 2 - трубный пучок, 3 - штуцера для теплоносителя «2», 4 - распределительная камера, 5 - перегородка, 6 - штуцера для теплоносителя «1»

Геометрические характеристики теплообменника: $D = 1200 \text{ мм}$; $d \times \delta = 25 \times 2 \text{ мм}$; $n = 1090$; $L = 9,0 \text{ мм}$; $Z = 2$; $F = 765 \text{ м}^2$.

В межтрубном пространстве теплообменника поперечные перегородки отсутствуют.

1. Определение средней разности температур между теплоносителями.

Температурная схема при противотоке:

$$\begin{aligned} t_{H1} = 60^\circ\text{C} &\longrightarrow t_{K1} = 40^\circ\text{C} \\ t_{K2} = 35^\circ\text{C} &\longleftarrow t_{H2} = 25^\circ\text{C} \\ \Delta t_B = 60 - 35 = 25^\circ\text{C}; \quad \Delta t_M = 40 - 25 = 15^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Для кожухотрубчатых теплообменников с четным числом ходов по трубному пространству и одним ходом в межтрубном пространстве средняя разность температур Δt_{cp} определяется по формуле [1, с. 167]

$$\Delta t_{cp} = \frac{A}{\ln \frac{\Delta t_B + \Delta t_M + A}{\Delta t_B + \Delta t_M - A}} = \frac{22,36}{\ln \frac{25 + 15 + 22,36}{25 + 15 - 22,36}} = 17,75^\circ\text{C}$$

$$\text{где } A = \sqrt{(\delta t_1)^2 + (\delta t_2)^2} = \sqrt{(60 - 40)^2 + (35 - 25)^2} = 22,36^\circ\text{C}$$

2. Определение средней температуры теплоносителей.

В рассматриваемом случае $(t_{K2} - t_{H2}) < (t_{H1} - t_{K1})$, поэтому средняя температура теплоносителя с меньшим изменением температур, т. е. воды, определяется по соотношению

$$t_{cp2} = \frac{t_{K2} + t_{H2}}{2} = \frac{35 + 25}{2} = 30^\circ\text{C}$$

Средняя температура метилового спирта Δt_{cp1} определяется по формуле (4.82) [1, с. 167]:

$$t_{cp1} = t_{cp2} + \Delta t_{cp}$$

3. **ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН**
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Щербухова Татьяна Александровна
Объемный расход метилового спирта
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

температуры теплоносителей определяются их теплофизические свойства по табл. 2.
4. Определение объемного и массового расхода метилового спирта .

$$V_1 = \omega_1 \cdot S_1 = 0,8 \cdot 0,189 = 0,151 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{где } S_1 = \frac{n}{Z} \cdot 0,785 \cdot d_{вн}^2 = \frac{1090}{2} \cdot 0,785 \cdot 0,021^2 = 0,189 \text{ м}^2.$$

Теплофизические свойства теплоносителей.

Теплоноситель	$t_{ср}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{K}$
Метиловый спирт	47,75	765	2640	0,410	0,208
Вода	30,00	996	4180	0,804	0,618
Источники информации	[1, с. 195, 520] [1, с. 544, 520] [1, с. 538, 520] [1, с. 520, 543]				

Массовый расход метилового спирта

$$G_1 = \rho_1 \cdot V_1 = 765 \cdot 0,151 = 115,7 \text{ кг/с}$$

5. Определение теплового потока в аппарате:

$$Q = c_1 \cdot G_1 \cdot (t_{н1} - t_{к1}) = 2640 \cdot 115,7 \cdot (60 - 40) = 6108265 \text{ Вт},$$

где C_1 - теплоемкость метилового спирта при температуре $t_{ср1}$ (табл. 2).

6. Определение объемного и массового расхода воды.

Массовый расход воды

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{к2} - t_{н2})} = \frac{6108265}{4180 \cdot (35 - 25)} = 146,1 \text{ кг/с}$$

где C_2 - теплоемкость воды при температуре $t_{ср2}$ (табл. 2)

Объемный расход воды

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{146,1}{996} = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$$

где ρ_2 - плотность воды при температуре $t_{ср2}$

7. Определение средней скорости воды:

$$\omega_2 = \frac{V_2}{S_2} = \frac{0,15}{0,596} = 0,25 \text{ м/с}$$

где $S_2 = 0,785 \cdot (D^2 - n \cdot d_n^2) = 0,785 \cdot (1,2^2 - 1090 \cdot 0,025^2) = 0,596 \text{ м}^2$

8. Определение значений критериев Рейнольдса и режимов течения теплоносителей.

Для метилового спирта

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot d_{экв1} \cdot \rho_1}{\mu_1} = \frac{0,8 \cdot 0,021 \cdot 765}{0,41 \cdot 10^{-3}} = 31350$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$d_{экв1} = d_{вн}$; μ_1 - вязкость метилового

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_{экв2} \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{0,25 \cdot 0,0267 \cdot 996}{0,804 \cdot 10^{-3}} = 8273,$$

где $d_{экв2}$ - эквивалентный диаметр межтрубного пространства теплообменника. При продольном обтекании труб

$$d_{экв2} = \frac{D^2 - n \cdot d_H^2}{D + n \cdot d_H} = \frac{1,2^2 - 1090 \cdot 0,025^2}{1,2 + 1090 \cdot 0,025} = 0,0267 \text{ м.}$$

Рассчитанные значения критериев Рейнольдса используются для определения режима движения теплоносителей. Для метилового спирта $Re_1 = 31350 > 10^4$, поэтому режим его течения по трубам теплообменника является устойчиво турбулентным. Режим течения воды в межтрубном пространстве теплообменника является неустойчиво турбулентным (переходным), так как $Re_2 = 8273 < 10^4$.

9. Определение расчетных коэффициентов теплоотдачи.

Метиловый спирт. Расчет критерия Нуссельта при развитом турбулентном течении в прямых трубах ($Re > 10^4$) осуществляется по формуле (4.17) [1, с. 150]:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot \varepsilon_1 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{cm1}}\right)^{0,25},$$

$$\text{где } Pr_1 = \frac{c_1 \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{2640 \cdot 0,41 \cdot 10^{-3}}{0,208} = 5,2.$$

Определяющей температурой является средняя температура потока $\varepsilon_1 = 1$ при $\frac{L}{d} = \frac{6}{0,021} > 50$ [1, с. 151].

Ориентировочно принимается, что $\left(\frac{Pr_1}{Pr_{cm1}}\right)^{0,25} = 1$. Тогда

$$Nu_1 = 0,021 \cdot 1 \cdot 31350^{0,8} \cdot 5,2^{0,43} = 168,7;$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_{экв1}} = \frac{168,7 \cdot 0,208}{0,021} = 1670,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Вода. В случаях, когда $2300 < Re < 10^4$, для расчета коэффициента теплоотдачи рекомендуется приближенное уравнение:

$$Nu_2 = 0,008 \cdot Re_2^{0,9} \cdot Pr_2^{0,43}$$

Определяющей температурой является средняя температура $t_{ср2}$.

$$Pr_2 = 5,42.$$

$$0,008 \cdot 8273^{0,9} \cdot 5,42^{0,43} = 55,54.$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{экв2}} = \frac{55,54 \cdot 0,618}{0,0267} = 1285,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

10. Расчетный коэффициент теплопередачи без учета загрязнений стенки

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{1670,9} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{1285,5}} = 704,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $\lambda_{cm}=46,5$ Вт/(м·К) - теплопроводность стенки [1, с. 512].

11. Расчетный коэффициент теплопередачи с учетом загрязнений стенки

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{1670,9} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{4500} + \frac{1}{5800} + \frac{1}{1285,5}} = 552 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $\sum r_{загр} = r_{загр1} + r_{загр2} = \frac{1}{4500} + \frac{1}{5800}$ ($r_{загр1}, r_{загр2}$ - соответственно загрязнения стенки со стороны метилового спирта и воды). Значения $r_{загр}$ принимаются на основании рекомендаций, приведенных в табл. 31 [1, с. 514].

12. Определение температуры стенки со стороны метилового спирта t_{cm1} и со стороны воды t_{cm2} (рис. 7.11,а):

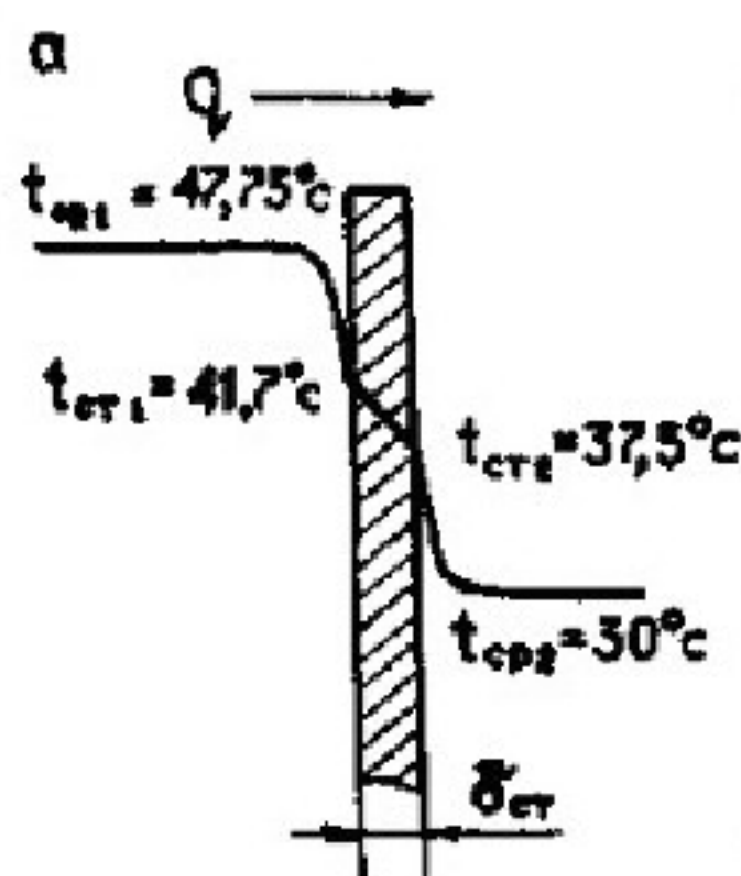


Рис.1.2. Теплопередача через плоскую стенку

$$t_{cm1} = t_{cp} - \frac{K \cdot \Delta t_{cp}}{\alpha_1} = 47,75 - \frac{552 \cdot 17,75}{1670,9} = 41,9^\circ \text{C};$$

$$t_{cm2} = t_{cp1} + \frac{K \cdot \Delta t_{cp}}{\alpha_2} = 30 + \frac{552 \cdot 17,75}{1285,5} = 37,6^\circ \text{C}.$$

13. Удельный коэффициент теплопередачи.

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

направления теплового потока $\left(\frac{Pr_1}{Pr_{cm1}}\right)^{0,25}$:

$$Pr_{cm1} = \frac{c_1' \cdot \mu_1'}{\lambda_1'} = \frac{2597,8 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}}{0,209} = 5,94,$$

где c_1' , μ_1' , λ_1' - берутся при температуре t_{cm1} , $c_1' = 2597,8$ Дж/(кг·К) [1, с. 544], $\mu_1' = 0,48 \cdot 10^{-3}$ Па/с [1, с. 538], $\lambda_1' = 0,209$ Вт/(м·К) [1, с. 543],

$$Nu_1' = 0,021 \cdot 31350^{0,8} \cdot 5,2^{0,43} \cdot \left(\frac{5,2}{5,94}\right)^{0,25} = 163,03,$$

$$\alpha_1' = \frac{163,03 \cdot 0,209}{0,021} = 1616 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплопередачи со стороны воды α_2 не пересчитывается, так как в расчетное уравнение (4.23) температура стенки не входит.

Определение уточненного коэффициента теплопередачи:

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{1616} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{4500} + \frac{1}{5800} + \frac{1}{1285,5}} = 546 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Уточнение температуры стенки:

$$t_{cm1}' = 47,75 - \frac{546 \cdot 17,75}{1616} = 41,7^\circ \text{C},$$

$$t_{cm2}' = 30 + \frac{546 \cdot 17,75}{1285,5} = 37,5^\circ \text{C}.$$

Так как $t_{cm1} \approx t_{cm1}'$ и $t_{cm2} \approx t_{cm2}'$, то пересчета K' производить не следует.

14. Расчет диаметров штуцеров для метилового спирта.

Скорость метилового спирта в штуцере принимается ориентировочно [1, с. 10],

$$\omega_{um1} = 2,0 \text{ м/с}.$$

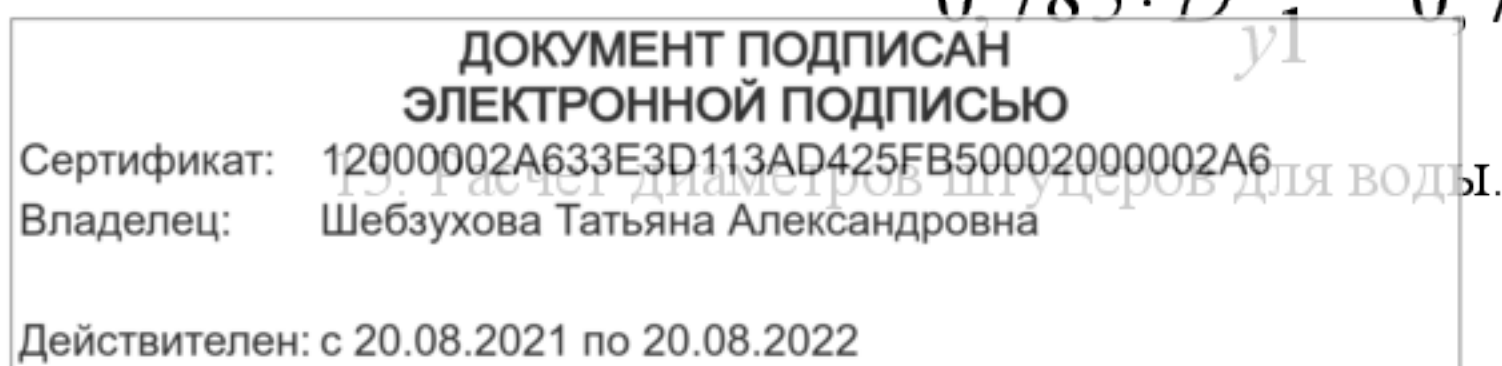
Диаметр штуцеров для метилового спирта

$$d_1 = \sqrt{\frac{V_1}{0,785 \cdot \omega_{um1}}} = \sqrt{\frac{0,151}{0,785 \cdot 2,0}} = 0,310 \text{ м}.$$

По ОСТ 26-1404-76 выбираются штуцера с условным диаметром $D_{y1} = 300$ мм.

Уточнение скорости метилового спирта в штуцере:

$$\omega_{um1}' = \frac{V_1}{0,785 \cdot D_{y1}^2} = \frac{0,151}{0,785 \cdot 0,3^2} = 2,14 \text{ м/с}.$$



Ориентировочно принимается скорость воды в штуцере [1, с.10] $\omega_{um2} = 1,5$ м/с. Скорость воды в штуцере принята меньше, чем скорость метилового спирта, так как вязкость $\mu_2 > \mu_1$.

Диаметр штуцера для подачи воды

$$d_{um2} = \sqrt{\frac{V_2}{0,785 \cdot \omega_{um2}}} = \sqrt{\frac{0,15}{0,785 \cdot 1,5}} = 0,36 \text{ м.}$$

По ОСТ 26-1404-76 выбирается штуцер с условным диаметром $D_{y2} = 350$ мм.

Уточнение скорости воды в штуцере:

$$\omega'_{um2} = \frac{V_2}{0,785 \cdot D_{y2}^2} = \frac{0,15}{0,785 \cdot 0,35^2} = 1,56 \text{ м/с.}$$

16. Расчет гидравлического сопротивления теплообменника (трубное пространство).

Потеря давления на преодоление трения в трубах

$$\Delta P_{tr1} = \lambda' \cdot \frac{Z \cdot L}{d_{экв1}} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \rho_1 = 0,037 \cdot \frac{2 \cdot 9 \cdot 0,8^2 \cdot 765}{0,021 \cdot 2} = 7763,7 \text{ Па.}$$

Здесь λ' - коэффициент трения. Для стальных труб с незначительной коррозией принимается шероховатость $e = 0,2$ мм, отношение $d_{экв}/e = 21/0,2=105$. Для $Re_1 = 31\,350$ и $d_{экв}/e=105$ $\lambda' = 0,037$.

Для расчета потерь давления на преодоление местных сопротивлений используются данные, приведенные в табл. 3. Если скорость в штуцере ω'_{um1} больше скорости в трубах ω_1 , потери давления для входной и выходной камер определяются по скорости в штуцерах, а потери при входе и выходе из труб и при повороте из одного хода в другой - по скорости в трубах ω_1 .

Виды местных сопротивлений в трубном пространстве теплообменника и коэффициента сопротивлений

Виды сопротивлений в трубном пространстве теплообменника	ξ_{11}	$\sum \xi_{11}$
Входная и выходная камера	1,5	$1,5 \cdot 2$
Вход в трубы и выход из них	1,0	$1,0 \cdot 2$
Поворот между ходами на 180°	2,5	2,5

$$\Delta P_{м.с1} = \sum \xi_{11} \cdot \rho_1 (\omega'_{ш1})^2/2 + (\sum \xi_{12} + \sum \xi_{13}) \cdot \rho_1 (\omega_1)^2/2 = 1,5 \cdot 765 \cdot 2,14^2/2 + (1,0 \cdot 2 + 2,5) \cdot 765 \cdot 0,8^2/2 = 6846,3 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление трубного пространства теплообменника:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{тр1} + \Delta P_{м.с1} = 7763,7 + 6846,3 = 14610 \text{ Па.}$$

17. Расчет гидравлического сопротивления в межтрубном пространстве теплообменника.

Потеря давления на преодоление трения в межтрубном пространстве:

$$\Delta P_{тр1} = \lambda'' \cdot (L/d_{экв}) \cdot (\omega_1^2/2) \cdot \rho_2 = 0,0403 \cdot (9/0,0267) \cdot (0,25^2/2) \cdot 996 = 422,8 \text{ Па.}$$

Для $Re = 8273$ и $d_{экв}/e = 26,7/0,2 = 133$; $\lambda'' = 0,0403$.

Для расчета потерь давления на преодоление местных сопротивлений в межтрубном пространстве теплообменника используются данные приведенные в табл.

Виды местных сопротивлений в межтрубном пространстве теплообменника и коэффициенты сопротивлений

Виды сопротивлений в межтрубном пространстве теплообменника	ξ_2	$\sum \xi_2$
Вход в межтрубное пространство и выход из него	1,5	$1,5 \cdot 2$
Поворот на 90° в межтрубном пространстве	1,0	$1,0 \cdot 2$

Сопротивление в межтрубном пространстве

$$\Delta P_{м.с2} = \sum \xi_{21} \cdot \rho_2 (\omega'_{ш2})^2/2 + \sum \xi_{22} \cdot \rho_2 (\omega_2)^2/2 = 1,5 \cdot 2 \cdot 996 \cdot 1,56^2/2 + 1,0 \cdot 2 \cdot 996 \cdot 0,25^2/2 = 36358 + 62,3 = 3698,1 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление межтрубного пространства

$$\Delta P_2 = \Delta P_{тр2} + \Delta P_{м.с2} = 422,8 + 3698,1 = 4120,9 \text{ Па.}$$

18. Определение расчетной площади поверхности теплообмена

$$F = Q/(K \cdot \Delta t_{ср}) = 6108265/(546 \cdot 17,75) = 630,3 \text{ м}^2.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

теплообменника площадь поверхности теплообмена составляет 765 м^2 . Запас площади поверхности теплообмена составляет:

$$(F - F_p) \cdot 100 / F = (765 - 630,3) \cdot 100 / 765 = 14,6 \text{ \%}.$$

Такой запас площади поверхности теплообмена является достаточным, следовательно, теплообменник с $F = 765 \text{ м}^2$ может быть использован для охлаждения метилового спирта от $t_{к1} = 60 \text{ °C}$ до $t_{к2} = 40 \text{ °C}$.

1.3. Контрольные вопросы.

1. Теплообменный аппарат, для которого охлаждение является целевым процессом, а нагрев охлаждающего агента побочным, называется:

1) кристаллизатор; 2) холодильник; 3) конденсатор; 4) испаритель.

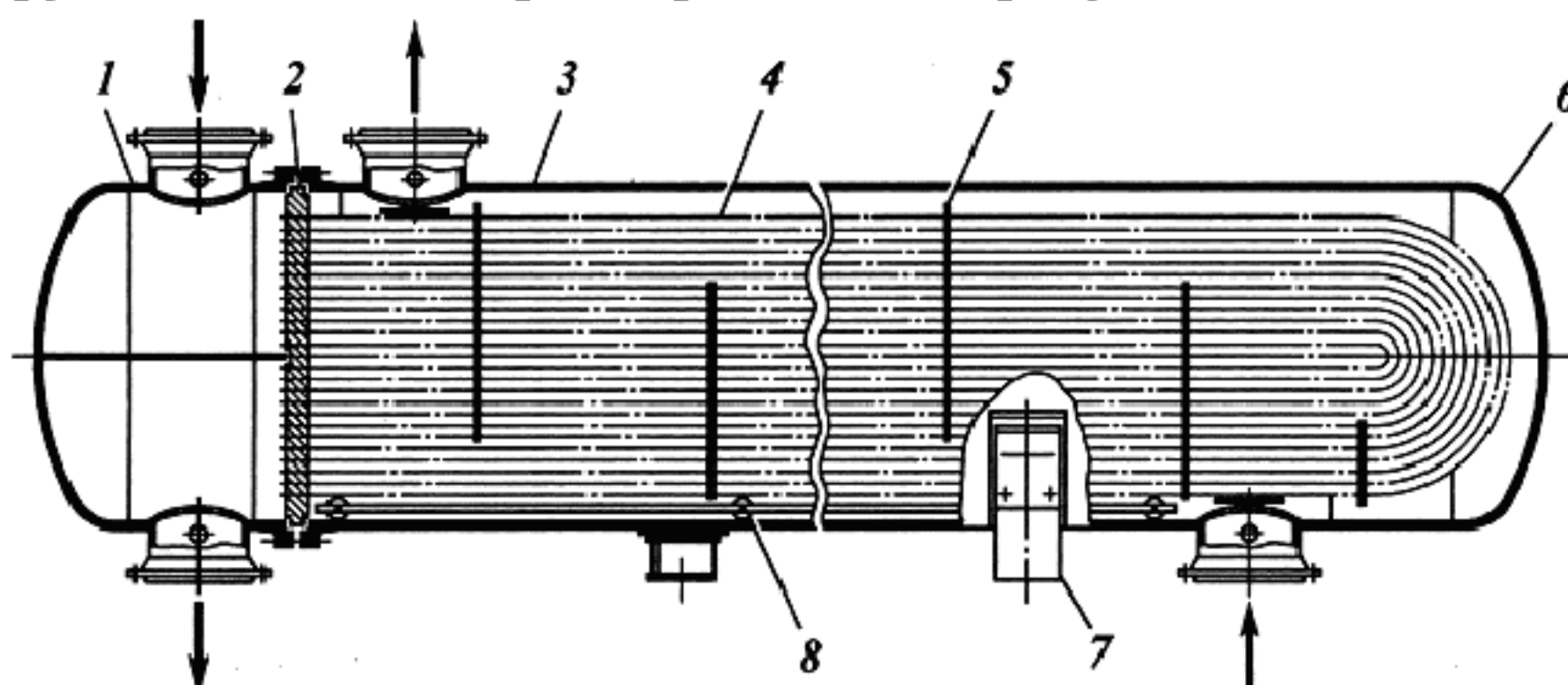
2. Аппараты, предназначенные для охлаждения соответствующих жидких потоков до температур, обеспечивающих образование кристаллов некоторых составляющих смеси веществ, называются:

1) кристаллизатор;
2) кипятильник;
3) аппарат смешения;
4) холодильник.

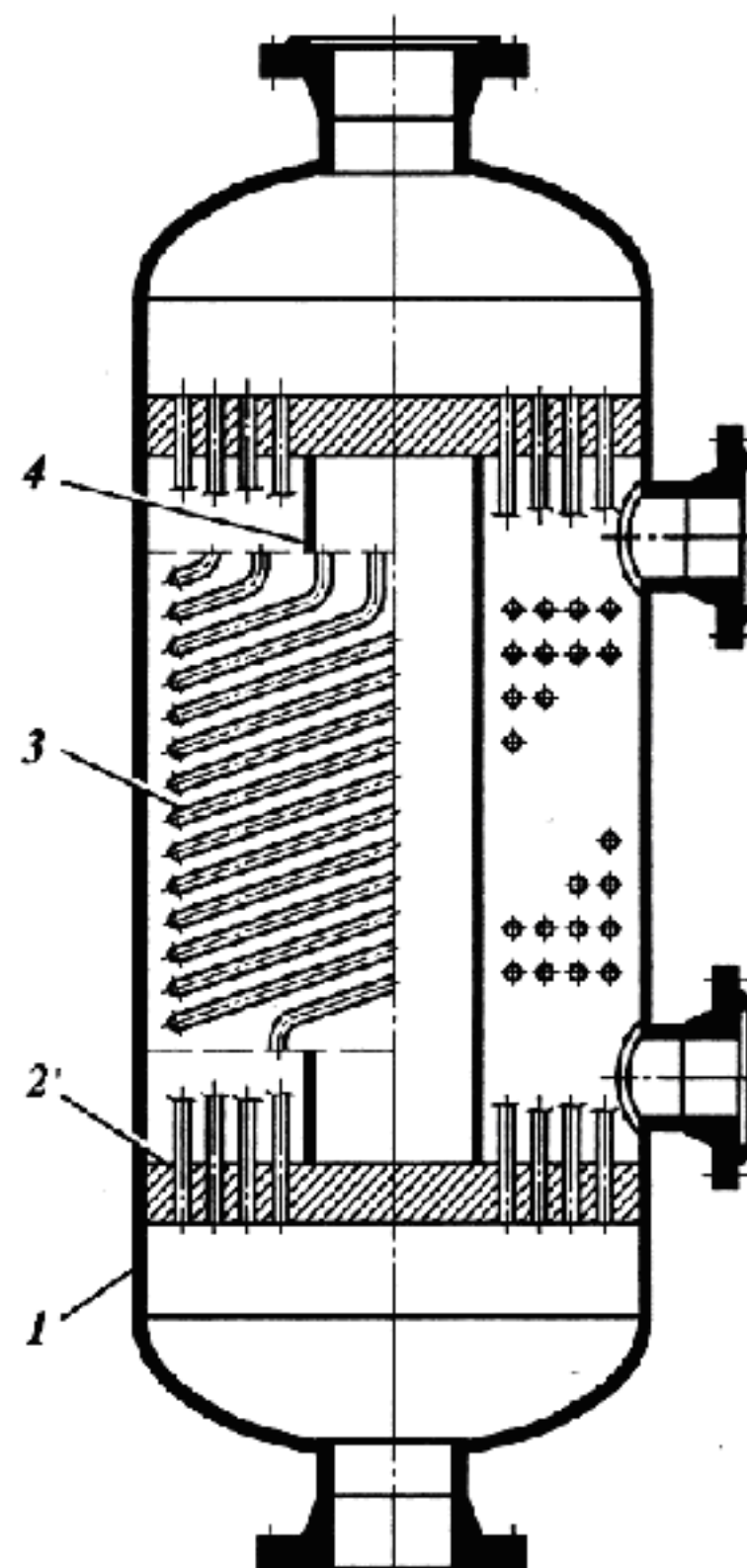
3. В каком аппарате нагрев одной среды является целевым процессом, тогда как охлаждение горячего потока является побочным и обуславливается необходимостью нагрева исходного холодного потока, называется:

1) испаритель; 2) холодильник; 3) кристаллизатор; 4) нагреватель.

4. Конструкция какого аппарата приведена на рисунке:



1) кожухотрубчатые теплообменные аппараты с плавающей головкой;
2) вертикальный кожухотрубчатый испаритель;
3) ребойлер;
4) кожухотрубчатый теплообменник с U-образными трубками.
5. Конструкция какого аппарата показана на рисунке:



- 1) кожухотрубчатый теплообменник с U-образными трубками;
 - 2) теплообменный аппарат с двойными трубками;
 - 3) теплообменный аппарат с витыми трубками;
 - 4) спиральный теплообменник.
5. Теплообменный аппарат, поверхность которого образована набором тонких штампованных пластин с гофрированной поверхностью, называется:
- 1) спиральный теплообменник;
 - 2) пластинчатый теплообменник;
 - 3) теплообменный аппарат с витыми трубками;
 - 4) кристаллизатор типа «труба в трубе».
6. По какому признаку теплообменные аппараты смешения делятся на:
- аппараты со специальными распыливающими и распределительными устройствами;
 - каскадные, снабженные специальными полками или перегородками (способствующими смешению);
 - насадочные, в которых контакт происходит в основном на поверхности насадки:
- 1) в зависимости от внутреннего устройства;
 - 2) в зависимости от способа смешения потоков;
 - 3) в зависимости от агрегатного состояния смешиваемых потоков.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Выпаривание.

2.1. Пример расчета выпарной установки.

Задание. Рассчитать двухкорпусную выпарную установку для концентрирования раствора по следующим данным:

1. Количество раствора, поступающего на выпаривание G_H , кг/час
2. Начальная концентрация раствора X_H , %
3. Конечная концентрация раствора X_K , %
4. Давление греющего 1-й корпус пара P_1 , атм.
5. Абсолютное давление в барометрическом конденсаторе $P_{конд}$, атм.
6. Схема установки – прямоток
7. Раствор поступает на выпаривание подогретым до температуры кипения

Для решения поставленной задачи необходимо, прежде всего составить технологическую схему установки, рис. 5.8.

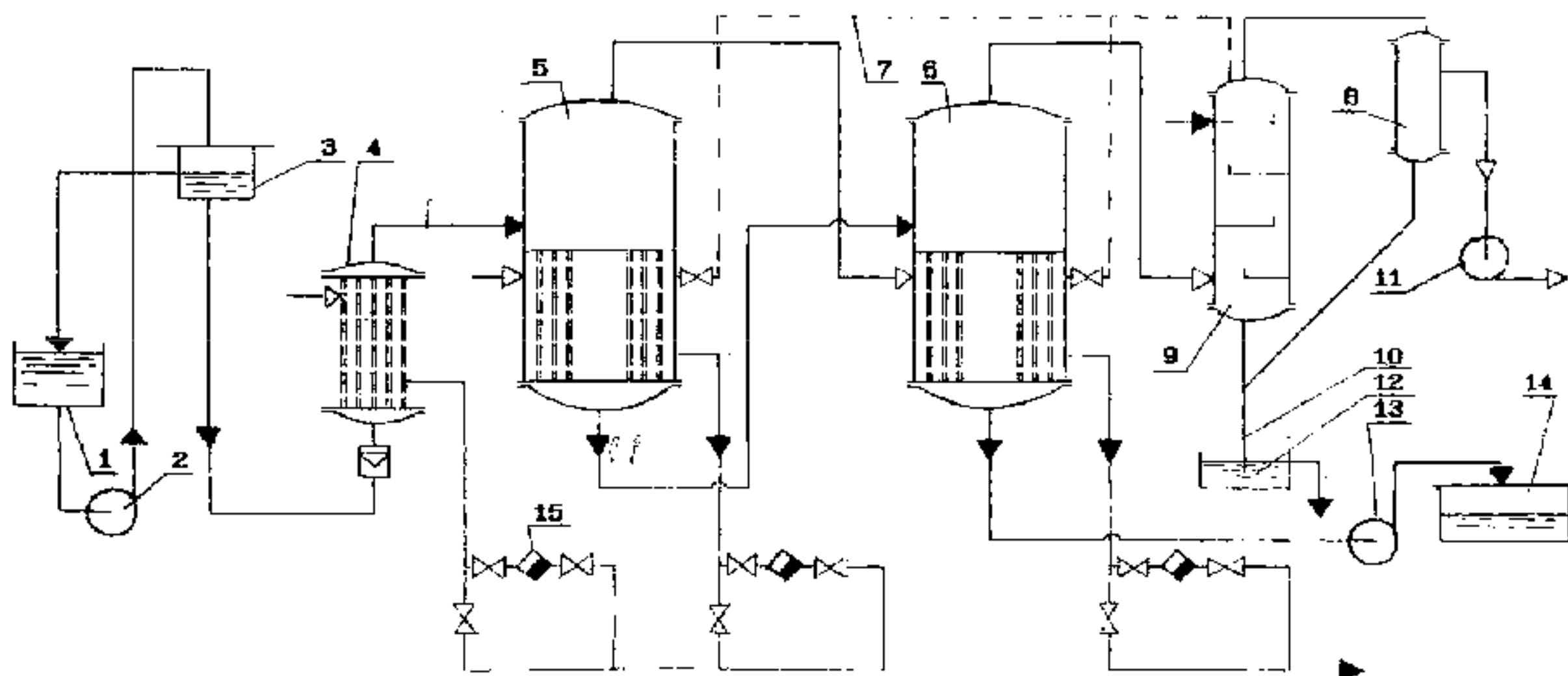


Рис. 2.1. Расчетная схема двухкорпусной прямоточной выпарной установки

- | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. Емкость исходного раствора | 7. Линия отсоса воздуха | 12. Гидрозатвор |
| 2. Насос | 8. Ловушка | 13. Насос |
| 3. Напорный бак | 9. Барометрический конденсатор | 14. Сборник выпаренного раствора |
| 4. Подогреватель исходного раствора | 10. Барометрическая труба | 15. Кондсатоотводчик |
| 5, 6. Корпуса установки | 11. Вакуум-насос | |

Расчет прямоточной двухкорпусной выпарной установки будем выполнять методом последовательных приближений, исходя из предположения, что отсутствует самоиспарение раствора, и нет перепуска конденсата из корпуса в корпус.

Расчет.

1. Определение количества воды, выпариваемой всей установкой:

$$W = G_H(1 - X_H/X_K), \text{ кг/час}$$

где G_H – количество исходного раствора, кг/час; X_H – начальная концентрация раствора, вес %; X_K – конечная концентрация раствора, вес %.

2. Количество воды, выпариваемое по корпусам, предварительно принимаем равным:

$$W_1 = W_2 = W/2, \text{ кг/час.}$$

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

– в 1 корпусе

$$X_{к1} = (G_{н} \cdot X_{н}) / (G_{н} - W_1), \% \text{ вес.};$$

– во 2 корпусе

$$X_{к2} = (G_{н} \cdot X_{н}) / (G_{н} - W_1 - W_2), \% \text{ вес.}$$

4. Распределение перепада давлений по корпусам. Разность между давлением греющего пара в первом корпусе (из котельной) и давлением пара в барометрическом конденсаторе:

$$\Delta P = P_1 - P_{\text{конд.}}$$

Предварительно принимаем давления по корпусам, исходя из равных перепадов давлений для каждого корпуса. Перепад давления для каждого корпуса:

$$\Delta P_n = (P_1 - P_{\text{конд.}}) / 2, \text{ ат.}$$

Тогда давления вторичных паров по корпусам будут соответственно:

– в 1-ом корпусе

$$P_{\text{вт1}} = P_1 - \Delta P_n, \text{ ат.};$$

– во-2-ом корпусе

$$P_{\text{вт2}} = P_{\text{вт1}} - \Delta P_n = P_{\text{конд.}}, \text{ ат.}$$

5. Общая разность температур для всей установки:

$$\Delta t_{\text{общ}} = T_1 - T_{\text{конд}}$$

где T_1 – температура греющего пара в 1-ом корпусе, °С; $T_{\text{конд}}$ – температура в конденсаторе, °С.

Температуры паров определяются, исходя из соответствующих давлений по таблицам насыщенных водяных паров.

6. Расчет температурных потерь по корпусам.

Потери общей разности температур определим как сумму потерь от гидростатического эффекта, депрессионных физико-химических потерь и гидравлических потерь в трубопроводах.

а) Потери от гидростатического эффекта.

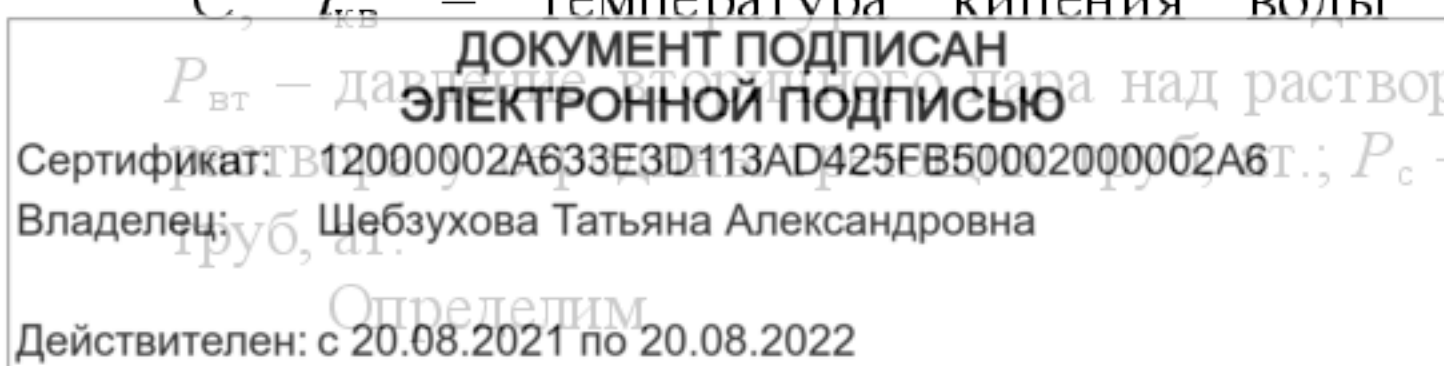
Предварительно выбираем (или задает преподаватель) по каталогу высоту кипятильных труб выпарного аппарата $h_{\text{тр}}$, диаметр труб $d_{\text{тр}}$, материал труб.

Потери от гидростатического эффекта возникают в связи с тем, что давление, а, следовательно, температура кипения на разных уровнях раствора в трубах различна. Потери от гидростатического эффекта могут быть определены как

$$\Delta \Gamma = t_{\text{квс}} - t_{\text{кв}},$$

где $t_{\text{квс}}$ – температура кипения воды (растворителя) при давлении $P_{\text{вт}} + \Delta P_{\text{г}} = P_{\text{с}}$, °С; $t_{\text{кв}}$ – температура кипения воды (растворителя) при давлении $P_{\text{вт}}$, °С;

$P_{\text{вт}}$ – давление вторичного пара над раствором, ат.; $\Delta P_{\text{г}}$ – гидростатическое давление раствора у середины греющих



$$\Delta P_r = h \cdot \rho / 10000, \text{ ат}$$

где $h = h_{изб} + (h_{тр}/2)$ – расстояние от верхнего уровня раствора до середины греющих труб; $h_{изб}$ – расстояние от верхнего уровня раствора до трубной доски; $h_{тр}$ – высота греющих труб; ρ – плотность раствора, кг/м³.

Плотности растворов ρ_1, ρ_2 могут быть найдены из соответствующих справочных данных по конечным концентрациям раствора по корпусам.

Гидростатическое давление растворов у середины греющих труб соответственно будет равно:

– в 1-ом корпусе

$$\Delta P_{r1} = h \cdot \rho_1 / 10000, \text{ ат};$$

– во 2-ом корпусе

$$\Delta P_{r2} = h \cdot \rho_2 / 10000, \text{ ат}.$$

Зная давления паров $P_{вт}$ по корпусам из п. 4 можно определить давления растворов у середины греющих труб:

– в 1-ом корпусе

$$P_{c1} = P_{вт1} + \Delta P_{r1}, \text{ ат};$$

– во 2-ом корпусе

$$P_{c2} = P_{вт2} + \Delta P_{r2}, \text{ ат}.$$

Тогда потери общей разности температур от гидростатического эффекта;

– в 1-ом корпусе

$$\Delta \Gamma_1 = t_{квс1} - t_{кв1}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– во 2-ом корпусе

$$\Delta \Gamma_2 = t_{квс2} - t_{кв2}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Примечание: Действительная гидростатическая депрессия составляет, обычно, около 20 % от полученной по расчету, т. к. жидкость находится в аппарате не в статическом состоянии, а в движении, обусловленном конвективными токами парожидкостной эмульсии, направленными вверх и вместо жидкости в трубах находится парожидкостная эмульсия.

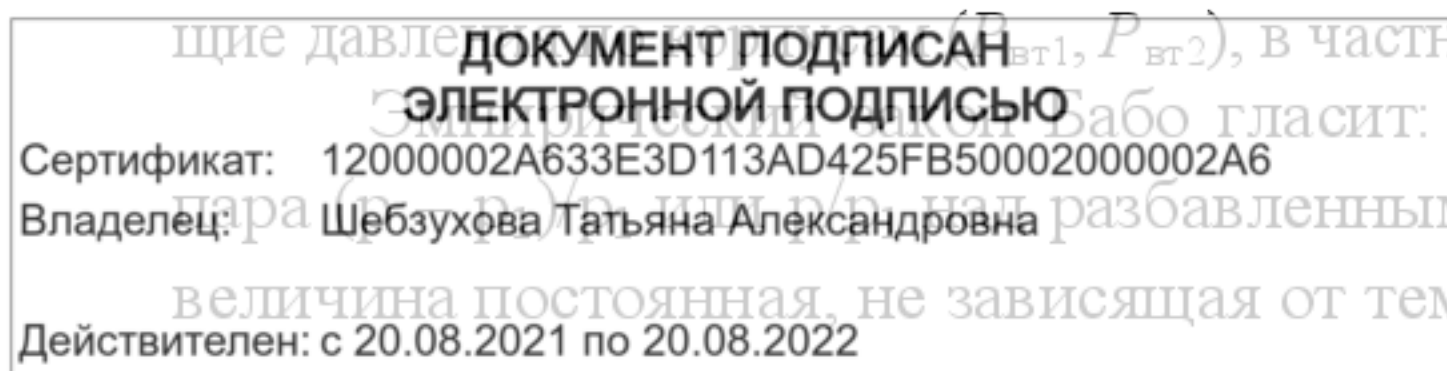
Общие потери за счет гидростатического эффекта:

$$\Sigma \Delta \Gamma = \Delta \Gamma_1 + \Delta \Gamma_2, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

б) Потери от физико-химической депрессии.

Депрессионные потери общей разности температур по корпусам определяются предварительно из справочной литературы ([3; 6; 7] табл. 4 приложение 2) как разность температуры кипения раствора данной концентрации (по конечным концентрациям в каждом корпусе) и температуры кипения чистого растворителя (воды) при атмосферном давлении. Далее делается перерасчет температурной депрессии на соответствующие давления паров ($P_{вт1}, P_{вт2}$), в частности, по правилу Бабо.

Значение ρ по правилу Бабо гласит: «Относительное понижение упругости пара (P/P_0) для чистых жидкостей и разбавленных раствором данной концентрации есть величина постоянная, не зависящая от температуры кипения раствора», т. е.



$$\frac{p - p_1}{p} = \left(\frac{p}{p_1} \right)_t = k = \text{const},$$

где p_1 – упругость пара раствора; p – упругость пара чистого растворителя.

Пользуясь правилом Бабо можно вычислить температуру кипения раствора, данной концентрации при произвольном давлении, если таковая известна для какого-либо давления.

Пример пересчета по правилу Бабо:

Водный раствор данной концентрации кипит при давлении 1 ат. и температуре 115 °С. Определить температуру его кипения при давлении 0,5 ат.

Из таблиц насыщенного водяного пара находим, что вода (растворитель) при температуре 115 °С имеет давление 1,724 ат., на основании чего

$$\left(\frac{p}{p_1} \right)_{115^\circ \text{C}} = \left(\frac{1}{1,724} \right)_{115^\circ \text{C}} = 0,58.$$

При давлении над раствором 0,5 ат.:

$$\left(\frac{p_1}{p} \right) = \left(\frac{0,5}{p} \right) = 0,58$$

Откуда

$$p = \left(\frac{0,5}{0,58} \right) = 0,864,$$

чему соответствует по таблицам насыщенного водяного пара температура кипения $t_k = 95^\circ \text{C}$.

Таким образом, данный раствор при $p = 0,5$ ат. кипит при температуре 95°С, а вода при том же давлении имеет температуру кипения 80,9 °С, следовательно температурная депрессия равна

$$\Delta g = 95 - 80,9 = 14,1^\circ \text{C}.$$

Для концентрированных растворов, кипящих под разрежением, к величине температурной депрессии, рассчитанной по правилу Бабо следует вводить поправку, предложенную В.Н. Стабниковым, величина которой зависит от отношения p_1/p и давления p_1 . Поправка прибавляется к величине депрессии, полученной по правилу Бабо, если теплота растворения положительна и вычитается, если эта теплота отрицательна.

Судя по данным Стабникова, погрешность при применении правила Бабо в среднем равна 1–3 °С.

Общая формула для расчета температурной депрессии:

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$\sum \Delta g = \Delta g_1 + \Delta g_2, ^\circ \text{C}.$$

в) В выпарных установках гидравлические потери при прохождении пара из парового пространства предыдущего корпуса в греющую камеру последующего составляют 1–1,5 °С.

Общие гидравлические потери:

$$\sum \Delta_{ГД} = \Delta_{ГД1} + \Delta_{ГД2}, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

7. Полезная разность температур для всей установки:

$$\Delta t_{\text{полез}} = \Delta t_{\text{общ}} - (\sum \Delta_{Г} + \sum \Delta_{г} + \sum \Delta_{ГД}), \text{ } ^\circ\text{С}.$$

8. Распределение полезной разности температур производим исходя из условия равных поверхностей нагрева, по соотношению:

$$\Delta t_{\text{полез.}n} = \Delta t \cdot [(Q_n/k_n)/\sum(Q_n/k_n)], \text{ } ^\circ\text{С}$$

где $\Delta t_{\text{полез.}n}$ – полезная разность температур из корпуса; k_n – коэффициент теплопередачи от греющего пара к кипящему раствору для корпуса n ; Q_n – количество тепла, передаваемого через греющую поверхность корпуса n .

Предварительно принимаем Q_n равным для всех корпусов: $Q_1 = Q_2$, и задаемся соотношением: $K_1/K_2 = 1/0,7$ (предварительно взято из практических данных).

Тогда:

$$\Delta t_{1\text{полез}} = \Delta t_{\text{полез}} [(Q_1/K_1)/(Q_1/K_1 + Q_1/(0,7K_1))];$$

$$\Delta t_{2\text{полез}} = \Delta t_{\text{полез}} [(Q_1/(0,7K_1))/(Q_1/K_1 + Q_1/(0,7K_1))].$$

9. Таким образом, для каждого корпуса мы имеем значения всех перепадов температур, что дает возможность уточнить температуры паров и растворов.

Температура кипения раствора у середины греющих труб в 1-ом корпусе:

$$t_{к1} = T_1 - \Delta t_{1\text{полез}}, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура кипения раствора у верхнего уровня в 1-ом корпусе:

$$t_{к1} = t_{к1} - \Delta \Gamma_1, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура вторичного пара в 1-ом корпусе:

$$t_{вт1} = t_{к1} - \Delta g_1, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура греющего пара во 2-ом корпусе:

$$T_2 = t_{вт1} - \Delta_{ГД1}, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура кипения раствора у середины греющих труб во 2-ом корпусе:

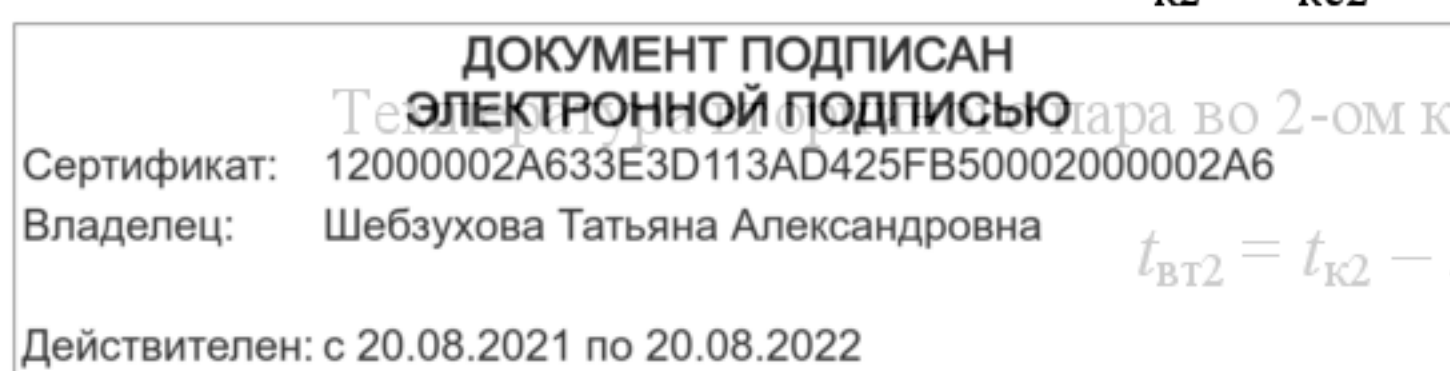
$$t_{к2} = T_2 - \Delta t_{2\text{полез}}, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура кипения раствора у верхнего уровня во 2-ом корпусе:

$$t_{к2} = t_{к2} - \Delta \Gamma_2, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Температура вторичного пара во 2-ом корпусе:

$$t_{вт2} = t_{к2} - \Delta g_2, \text{ } ^\circ\text{С}.$$



По этим уточненным температурам паров находим в таблицах насыщенных водяных паров М.П. Вукаловича соответственно давления и энтальпии паров и конденсата, а по концентрациям растворов (конечным) определяем их теплоемкости ([3; 6; 7], табл. 4, приложение 2). Полученные значения сводим в табл.

Дальнейшие расчеты производим, используя уточненные значения параметров растворов и паров из этой таблицы.

Параметры растворов и паров по корпусам

№№ П/П		1кор- пус	2кор- пус
1	Концентрация раствора, X_k весовые %		
2	Температура греющего пара, T , °C		
3	Полезная разность температур, $\Delta t_{\text{полез}}$, °C		
4	Температура кипения раствора у середины греющих труб, $t_{\text{кс}}$, °C		
5	Гидростатические потери, $\Delta \Gamma$, °C		
6	Температура кипения раствора у верхнего уровня, t_k , °C		
7	Депрессионные потери Δ_g , °C		
8	Температура вторичного пара, $t_{\text{вт}}$, °C		
9	Гидравлические потери, $\Delta \Gamma_d$, °C		
10	Давление греющего пара, P , ат.		
11	Теплосодержание греющего пара, λ , Дж/кг или ккал/кг		
12	Теплосодержание конденсата, θ , Дж/кг или ккал/кг		
13	Давление вторичного пара, $P_{\text{вт}}$, ат		
14	Теплосодержание вторичного пара, i , Дж/кг или ккал/кг		
15	Теплоемкость раствора, C_k , Дж/(кг·град) или ккал/(кг·град)		

10. Расход пара во 2-ом корпусе:

$$D_2 = m \cdot [W_2 \cdot (i_2 - C_{\text{н2}} \cdot t_{\text{н2}}) / (\lambda_2 - \theta_2) + G_{\text{к2}} \cdot (C_{\text{к2}} \cdot t_{\text{к2}} - C_{\text{н2}} \cdot t_{\text{н2}}) / (\lambda_2 - \theta_2)], \text{ кг/час.}$$

где m – коэффициент, учитывающий потери тепла аппаратом в окружающую среду. Обычно $m = 1,03$, т. е. принимают потери тепла в окружающую среду равными 3 % общего расхода; $C_{\text{н2}}$ – теплоемкость раствора, поступающего во 2-ой корпус, Дж/(кг·град) или ккал/(кг·град); $C_{\text{к2}}$ – теплоемкость раствора во 2-ом корпусе, Дж/(кг·град) или ккал/(кг·град); $t_{\text{н2}}$ – температура раствора, поступающего во 2-ой корпус, принимаемая равной температуре кипения раствора у середины греющих труб в 1 корпусе, °C; $t_{\text{к2}}$ – температура раствора, вытекающего из 2 корпуса, принимаемая равной температуре кипения раствора у середины греющих труб во 2-ом корпусе, °C; λ_2 – теплосодержание пара, греющего 2 корпус, Дж/кг или ккал/кг; i_2 – теплосодержание вторичного пара во 2 корпусе, Дж/кг или ккал/кг; θ_2 – теплосодержание конденсата в греющей камере 2 корпуса, Дж/кг или ккал/кг; $G_{\text{к2}}$ – количество раствора, вытекающего из 2 корпуса, кг/час.

Количество раствора, вытекающего из 2 корпуса:

$$G_{\text{к2}} = G_{\text{н1}} - W.$$

Количество воды, выпаренной в 1-ом корпусе:

$$W_1 = D_2.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$D_1 = 1,03 \cdot [W_1 \cdot (i_1 - C_{\text{н1}} \cdot t_{\text{н1}}) / (\lambda_1 - \theta_1) + G_{\text{к1}} \cdot (C_{\text{к1}} \cdot t_{\text{к1}} - C_{\text{н1}} \cdot t_{\text{н1}}) / (\lambda_1 - \theta_1)], \text{ кг/час} \quad (5.40),$$

(обозначения аналогичны обозначениям параметров во 2 корпусе) где количества раствора, вытекающего из 1 корпуса:

$$G_{к1} = G_{н1} - W_1.$$

11. Количество тепла, передаваемого через поверхность нагрева:

– во 2-ом корпусе

$$Q_2 = D_2 \cdot (\lambda_2 - \theta_2) / 3600, \text{ Вт или ккал/час;}$$

– в 1-ом корпусе

$$Q_1 = D_1 \cdot (\lambda_1 - \theta_1) / 3600, \text{ Вт или ккал/час.}$$

12. Расчет коэффициентов теплоотдачи по корпусам.

Чтобы определить коэффициент теплоотдачи в каждом корпусе необходимо предварительно найти α_1 – коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему раствору.

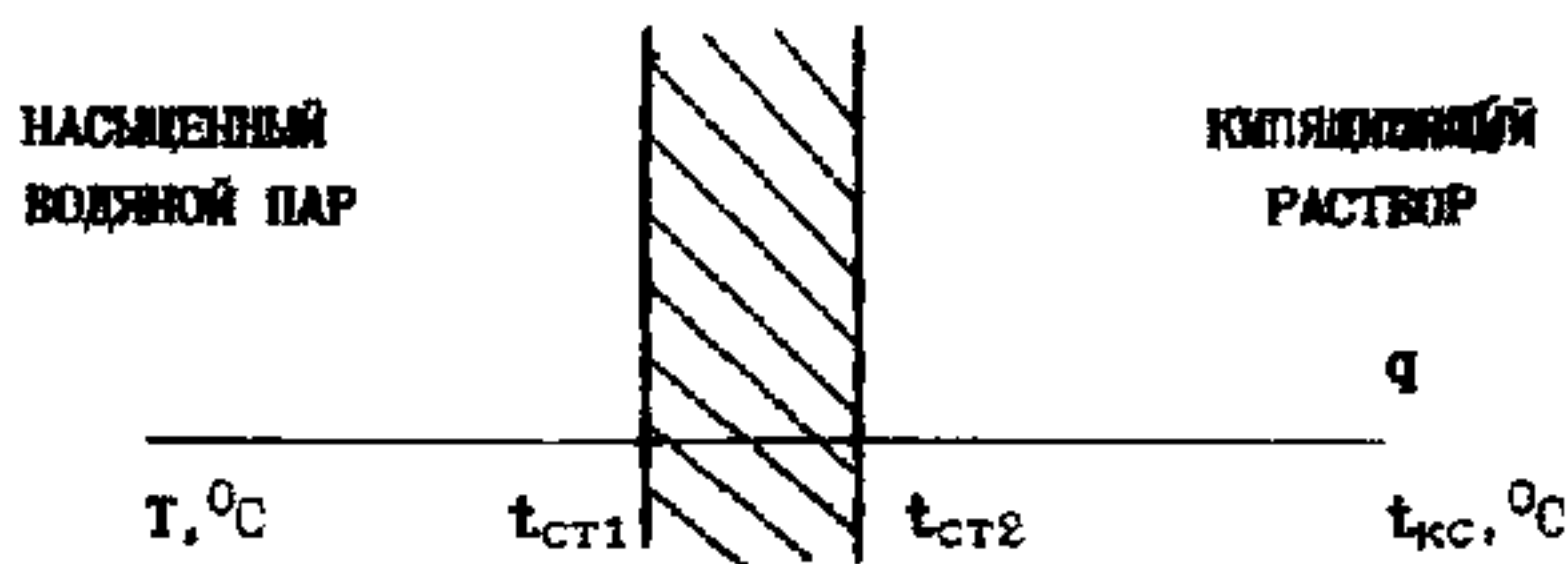


Рис. 2.2. T – температура греющего пара, $^{\circ}\text{C}$; $t_{кс}$ – температура кипения раствора у середины греющих труб, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ст1}$ – температура стенки со стороны пара, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ст2}$ – температура стенки со стороны кипящего раствора, $^{\circ}\text{C}$; q – удельный тепловой поток, ккал/(м·час) или Вт/м.

Расчет основывается на том, что при установившемся тепловом режиме удельное количество тепла, передаваемого в единицу времени в процессе конденсации пара, в процессе кипения жидкости – есть величина постоянная и равная количеству тепла, передаваемого от одного теплоносителя к другому, т. е.:

$$q_{кон} = q_{кип} = q$$

ИЛИ

$$\alpha_1 \cdot \Delta t' = \alpha_2 \cdot \Delta t'' = k \cdot \Delta t_{полез.}$$

а) Для определения коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации на вертикальных трубах рекомендуется формула Нуссельта:

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot A (r/H \cdot \Delta t')^{0,25}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$$

ИЛИ

$$\alpha_1 = 1,15 \cdot D (r/H \cdot \Delta t')^{0,25}, \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град)}$$

где: r – удельная теплота конденсации, Дж/кг или ккал/кг;
 H – высота кипяtilьных труб, м; $\Delta t' = t_{кон} - t_{ст1}$ – разность температур, $^{\circ}\text{C}$; значения A и D для различных веществ от температуры пленки конденсата приведены в табл. 3 прил.

Температура пленки определяется следующим образом:

$$t_{пл} = (t_{ст1} + t_{конд})/2.$$

Температура конденсации $t_{конд} = t_{пара}$ (см. в табл. 1 прил. 2) для соответствующего корпуса в зависимости от давления греющего пара.

Температурой стенки $t_{ст1}$, которая неизвестна, предварительно задаемся так, чтобы величина $\Delta t' = 2-10$ °С.

б) Определяем удельный тепловой поток при конденсации;

$$q_{кон} = \alpha_1 \cdot \Delta t'.$$

в) Определяем коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки к кипящему раствору по уравнению Кичигина-Тобилевича;

$$\alpha_2 = 1,82 \cdot [(\lambda_t \cdot (\gamma')^{0,2} \cdot (\gamma'')^{0,06} / (r^{0,6} \cdot (\gamma_c)^{0,66} \cdot C^{0,3} \cdot \sigma^{0,5} \cdot \nu^{0,3}))] \cdot q^{0,6} = A_m \cdot q^{0,6},$$

где λ_t – коэффициент теплопроводности раствора при температуре кипения, Вт/(м·град) или кал/м·час·град; γ' – удельный вес раствора при температуре кипения, н/м³ или кгс/м³; γ'' – удельный вес пара при давлении в паровом пространстве, н/м³ или кгс/м³; r – теплота парообразования воды при температуре кипения, Дж/кг или ккал/кг; γ_c – удельный вес сухого насыщенного пара при 1 ат, н/м³ или кгс/м³; C – удельная теплоемкость раствора при $t_{кип}$, Дж/(кг·град) или ккал/(кг·с·град); σ – поверхностное натяжение раствора при $t_{кип}$, Дж/м² или кгс/м; ν – коэффициент кинематической вязкости раствора при $t_{кип}$, м²/с или м²/час.

Примечание:

1. В системе СИ вместо удельных весов следует принимать плотности.

2. Для данного сахарного раствора величина коэффициента A_m может быть определена из рис. 1 прил. 2 по конечной концентрации и температуре кипения раствора в каждом корпусе соответственно.

г) Определяем коэффициент теплопередачи, предварительно принимая для всех корпусов среднюю толщину слоя накипи равной 0,0005 м, коэффициент теплопроводности накипи:

$$\lambda_{нак t} = 2,32 \text{ Вт/(м·град) или } \lambda_{нак t} = 2 \text{ ккал/(м·град);}$$

$$K = 1/[1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + \delta_{нак}/\lambda_{нак} + 1/\alpha_2].$$

д) Определив, таким образом K, α_1, α_2 и зная $\Delta t_{полез}$ в каждом корпусе соответственно из предварительных расчетов, проверяем принятое значение $\Delta t'$ по уравнению (5.11):

$$\Delta t' = T - t_{ст1} = K \cdot \Delta t_{полез} / \alpha_1.$$

Если расчетное значение отличается от принятого, то расчет повторяют до совпадения этих величин.

Время, затрачиваемое на расчет, может быть значительно сокращено, если построить нагрузочную характеристику $q - \Delta t_{полез}$ задавшись двумя, тремя значениями $\Delta t'$.

Результаты расчета и его последовательность сведены в табл. По результатам табл. для каждого корпуса.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022							
1 корпус				2 корпус			
$\Delta t_{cn}'=2$	$\Delta t_{cn}''=5$	$\Delta t_{cn}'''=7$		$\Delta t_{cn}'=2$	$\Delta t_{cn}''=5$	$\Delta t_{cn}'''=7$	
$\Delta t_{cn}'=$	$\Delta t_{cn}''=$	$\Delta t_{cn}'''=$		$\Delta t_{cn}'=$	$\Delta t_{cn}''=$	$\Delta t_{cn}'''=$	

1	$\alpha_1 = 1,15 \cdot B(r/H \cdot \Delta t)^{0,25}$						
2	$q_{\text{кон}} = \alpha_1 \cdot \Delta t'$						
3	$\alpha_2 = A_m \cdot q^{0,6}$						
4	$K = 1/[1/\alpha_1 + \delta_{\text{ст}}/\lambda_{\text{ст}} + \delta_{\text{нак}}/\lambda_{\text{нак}} + 1/\alpha_2]$						
5	$\Delta t_{\text{полез}} = q/K$						

По графику (рис. 2.3.), соответственно по корпусам для расчетного истинного значения полезной разности температур в корпусе определяем истинное значение удельной тепловой нагрузки $q_{\text{ист}}$.

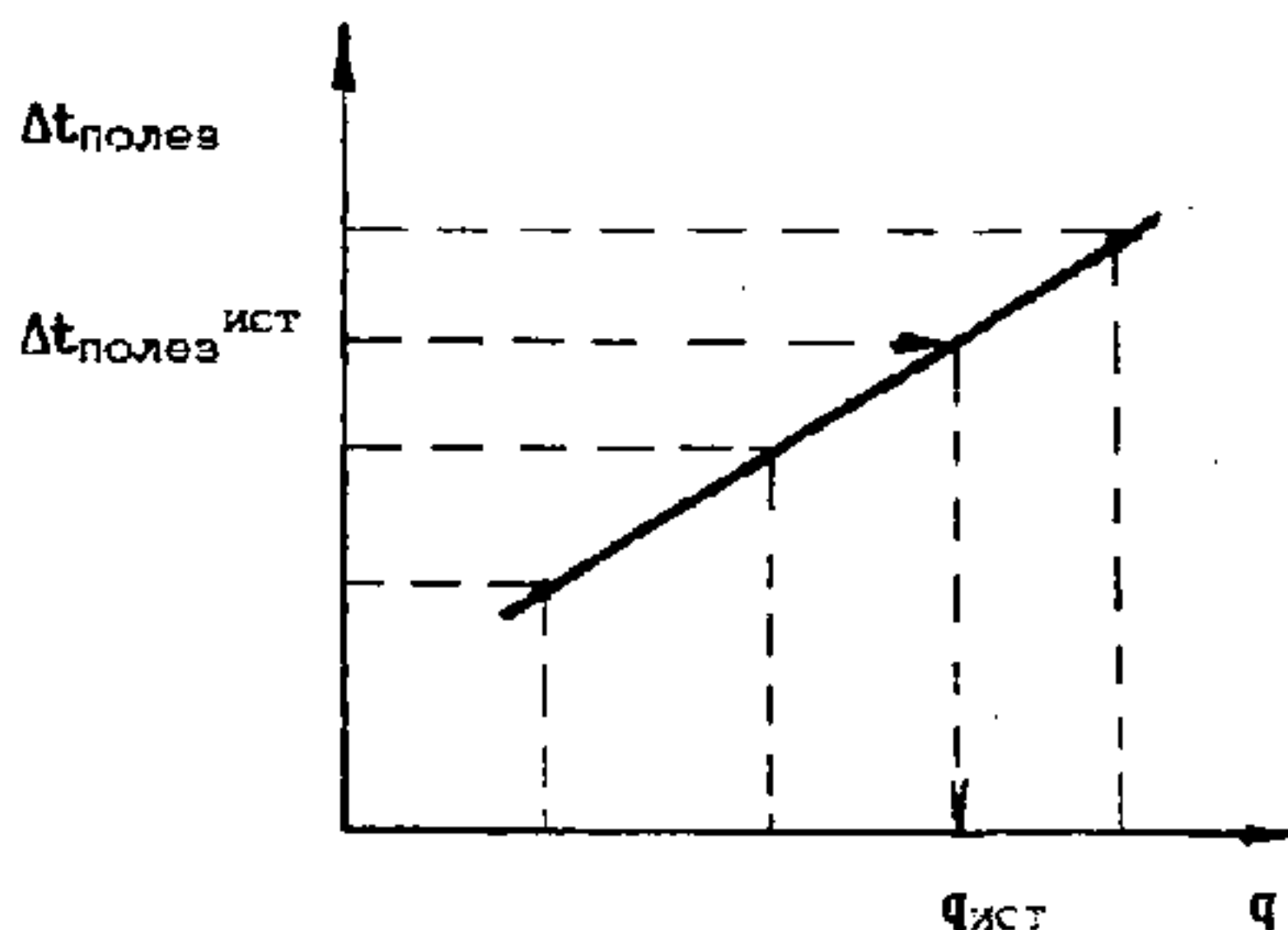


Рис. 2.3.

Следовательно, практическое значение $K = q_{\text{ист}}/\Delta t_{\text{полез}}$ для соответствующего корпуса.

13. Ориентировочная поверхность нагрева:

– в 1-ом корпусе

$$F_1 = Q_1/(K_1 \cdot \Delta t_{1 \text{ полез}});$$

– во 2-ом корпусе

$$F_2 = Q_2/(K_2 \cdot \Delta t_{2 \text{ полез}}).$$

14. Количество воды, выпариваемое всей установкой после пересчета, учитывая, что $D_2 = W_1$:

$$W_{\text{персч.}} = W_1 + W_2 = D_2 + W_2.$$

Полученное значение, как правило, отличается от величины рассчитанной в п. 1, поэтому необходимо провести перерасчет количеств воды, выпариваемых по корпусам, исходя из найденных при расчете соотношений: $W_1 = D_2$.

Количество воды, выпариваемой по корпусам после пересчета:

– в 1-ом корпусе

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 $W_{1 \text{ персч.}} = W \cdot (D_2/W_{\text{персч.}});$

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$W_{2 \text{ персч.}} = W \cdot (W_2/W_{\text{персч.}}).$$

Результаты расчетов первого приближения сводим в табл. Для получения более точного значения поверхностей нагрева по корпусам производят расчет во втором приближении и т. д. аналогично расчету первого приближения.

При этом, найденные в первом приближении величины считают предварительными для расчета во втором приближении и т. д. для обоих корпусов поверхности нагрева принимают равными средней из полученных при последнем приближении величине.

№№ п/п	Наименование параметров	Кор- пуса	Результаты расчетов			
			Предвари- тельные величины	Первое приближ- ение	Второе прибли- же-ние	Третье прибли- жение
1	Количество выпариваемой воды, кг/час	1				
		2				
2	Концентрация растворов, % вес.	1				
		2				
3	Давление вто- ричного пара, ат	1				
		2				
4	Полезная разность температур, °С	1				
		2				
5	Тепловая нагруз- ка аппарата, Q, Вт или ккал/час	1	Q			
		2	Q			
6	Коэффициент теплопередачи	1	K			
		2	0,7K			
7	Поверхность нагрева, м ²	1				
		2				
		Средняя				

2.2. Контрольные вопросы

1. Физическая сущность процесса выпаривания?
2. Что такое температурная депрессия и методы ее определения?
3. Для чего в выпарной аппарат встраивается греющая камера?
4. Какими параметрами отличается первичный греющий пар от вторичного пара?
5. Чем отличается полезная разность температур от общей разности?
6. Какие существуют способы экономии греющего пара?
7. В чем состоит оптимизация выбора числа корпусов выпарной установки?
8. Из каких статей складывается тепловой баланс выпарной установки?
9. Каковы достоинства и недостатки компоновочных решений выпарных установок (прямоток, противоток)?
10. Каков порядок расчета выпарных установок?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Тепло- и хладотехника : учебное пособие / С. В. Бутова, В. В. Воронцов, М. Н. Шахова [и др.]. — Воронеж: Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2016. — 248 с.
2. Цветков, О. Б. Теоретические основы тепло- и хладотехники. Основы термодинамики и тепломассопереноса : учебно-методическое пособие / О. Б. Цветков, Ю. А. Лаптев. — Санкт-Петербург : Университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий, 2015. — 54 с.

Дополнительная литература

1. Тепломассообмен в установках кондиционирования воздуха: методические указания : [16+] / сост. П.Т. Крамаренко, С.С. Козлов, И.П. Грималовская ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет и др. — Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 2013. — 39 с.
2. Буянов, О. Н. Тепло- и хладоснабжение предприятий пищевой промышленности: учебное пособие / О. Н. Буянов. — Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2006. — 282 с. — ISBN 5-89289-412-6. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт].
3. Кораблев, В. А. Лабораторный практикум по курсу теория тепло- и массообмена: учебное пособие / В. А. Кораблев, Д. А. Минкин, А. В. Шарков. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. — 37 с. — ISBN 2227-8397. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

для обучающихся по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Тепло- и хладотехника»

Направление подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация общественного
питания

Направленность (профиль) Технология и организация ресторанного дела

Пятигорск, 2022

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
Введение	3
Тема 1. Основы технической термодинамики	5
Тема 2. Свойства систем и процессы в них	6
Тема 3. Термодинамика движущегося газа	7
Тема 4. Теплопроводность. Конвективный теплообмен	8
Тема 5. Лучистый теплообмен. Теплопередача	10
Тема 6. Охлаждения систем	11
Тема 7. Хладагенты и хладоносители	12
Тема 8. Циклы холодильных машин	14
Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	16

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины рекомендуется вести в следующем порядке: внимательно ознакомиться с содержанием соответствующего раздела рабочей программы и методическими указаниями, прочитать по учебнику материал, рекомендуемый в программе для изучения данной темы.

При изучении материала полезно составлять конспекты по каждой теме изучаемой дисциплины.

Для положительной аттестации по дисциплине от студента требуется знание теоретических положений дисциплин, понимание физической сущности изучаемых явлений и процессов, умение применять теоретические положения к решению практических задач и выполнению лабораторных работ.

В результате освоения компетенций ОПК-2, ОПК-3, ПК-5 студент должен знать следующие понятия: Термодинамическая система. Термические параметры. Состояние системы. Первый закон термодинамики. Второй закон термодинамики. Идеальный газ как рабочее тело. Газовые смеси. Теплоемкость газов. Зависимость теплоемкости от температуры. Понятие термодинамического процесса. Уравнения и параметры потока газа. Течение газа в каналах. Терминология теплообмена. Основной закон теплопроводности. Теплопроводность плоской однослойной стенки. Основной закон теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи. Основы теории теплового подобия. Лучистый теплообмен. Закономерности лучистого теплообмена. Лучистый теплообмен между телами, разделенными прозрачной средой. Теплопередача. Уравнение теплопередачи. Теплопередача через плоскую стенку. Пути интенсификации теплопередачи. Принципы охлаждения. Способы понижения температуры рабочего тела. Дросселирование. Адиабатное расширение. Вихревой эффект охлаждения. Хладагенты и их свойства. Фазовые переходы хладагентов, их диаграммы состояния. Хладоносители. Цикл воздушной холодильной машины. Цикл паровой компрессорной холодильной машины. Цикл абсорбционной холодильной машины. Цикл теплового насоса.

Дисциплина «Тепло- и хладотехника» входит в обязательную часть дисциплин модуля подготовки бакалавра по направлению 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, направленности (профиля) Технология и организация ресторанного дела. Ее освоение происходит в 4 семестре.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование компетенций

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-2. Способен применять основные законы и методы исследований естественных наук для решения задач профессиональной деятельности	ИД-1 _{ОПК-2} Применяет основные положения, законы, методы исследований естественных наук при решении задач профессиональной деятельности ИД-2 _{ОПК-2} Использует навыки самостоятельной работы со специальной литературой для совершенствования знаний в области естественных наук для решения задач профессиональной деятельности	Анализирует способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов, технологии выполнения основных процессов холодильной обработки пищевых продуктов, разрабатывает мероприятия по совершенствованию технологических процессов производства продукции питания различного назначения
ОПК-3. Способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов	ИД-1 _{ОПК-3} Определяет эффективность и надежность процессов и аппаратов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов	Осознает правила эксплуатации различных видов технологического оборудования в соответствии с требованиями техники безопасности разных классов предприятий питания. Рассчитывает основные характеристики процессов тепло-хладотехники
ПК-5 способен применять специализированные и профессиональные знания, в том числе инновационные, в области технологии производства продуктов питания, определять направления развития технологии пищевых производств, повышения качества и безопасности готовой продукции с применением современного технологического оборудования, традиционных и новых видов сырья	ИД-1 _{ПК-5} Осуществляет контроль качества, безопасности сырья и готовой продукции с использованием нормативной документации, основных и прикладных методов исследований ИД-2 _{ПК-5} Организует технологический процесс производства продуктов питания массового изготовления и	Учитывает основные свойства сырья, физические и биохимические изменения в пищевых продуктах при охлаждении и замораживании, факторы и процессы, влияющие на изменение качества и питательной ценности пищевых продуктов. Осознавать выбор и применение инструментальных средств для обработки данных

	ИД-3 _{ПК-5} Выявляет объекты для улучшения технологии пищевых производств с учетом прогрессивных методов эксплуатации оборудования, принципов управления качеством, безопасностью и прослеживаемостью производства, основ физиологии пищеварения и обмена веществ, современных концепций питания	
--	---	--

Тема 1. Основы технической термодинамики

Термодинамика – это наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Термодинамика, являясь разделом теоретической физики, представляет собой одну из самых обширных областей современного естествознания – науку о превращениях различных видов энергии друг в друга.

Материальное тело, выделенное в качестве объекта исследования термодинамическим методом, называется термодинамической системой.

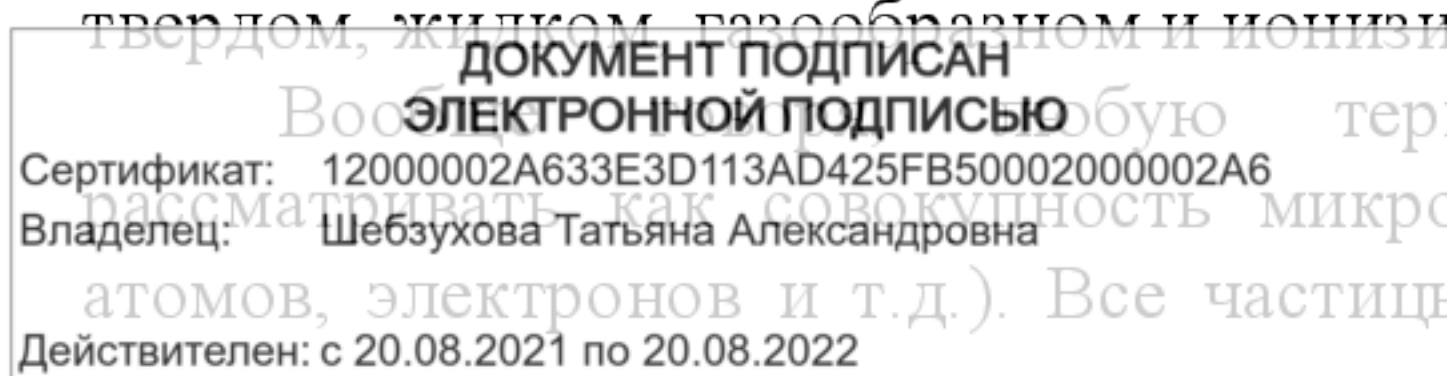
Все, что не включено в систему, но может взаимодействовать с ней (обмениваться энергией и веществом), представляет собой окружающую среду. Поверхность раздела между системой и окружающей средой принято называть контрольной поверхностью.

Термодинамическая система формируется в соответствии с решаемой задачей. Пространственные размеры термодинамической системы и время ее существования предполагаются достаточными для проведения измерений. Примерами термодинамических систем могут служить: газ в цилиндре поршневого компрессора; продукты сгорания в тракте газотурбинного двигателя; хладагент в агрегатах паровой компрессорной холодильной машины и т.д.

В зависимости от возможных способов изоляции системы от внешней среды различают несколько видов термодинамических систем. Если термодинамическая система обменивается с окружающей средой веществом, то такую систему называют открытой. У закрытых систем обмен веществом отсутствует. Среди закрытых систем выделяют энергоизолированные – такие, которые не обмениваются с окружающей средой никакими видами энергии. Кроме того, закрытые системы могут быть адиабатными – они не обмениваются с окружающей средой энергией только в форме теплоты.

Тела, входящие в термодинамическую систему, могут находиться в твердом, жидком, газообразном и ненасыщенном фазовых состояниях.

Воспринимать термодинамическую систему следует рассматривать как совокупность микрочастиц (агрегатов молекул, молекул, атомов, электронов и т.д.). Все частицы находятся в состоянии движения, и



между ними существуют силы взаимодействия. У тел в твердом состоянии силы взаимного притяжения молекул очень велики, вследствие чего тело имеет определенную форму. У тел в жидком состоянии межмолекулярные связи ослаблены до такой степени, что тело принимает форму сосуда, в котором оно находится.

В газообразных телах молекулы находятся на столь больших расстояниях друг от друга, что межмолекулярные силы весьма малы, и поэтому газ стремится к беспредельному расширению.

Совокупность физических свойств, присущих рассматриваемой системе, называют состоянием системы. Величины, характеризующие физические свойства, именуют параметрами состояния. В зависимости от способа определения их численных значений параметры состояния делятся на термические и калорические.

К термическим относят те параметры состояния, которые определяются путем измерений.

Калорические параметры также описывают состояние системы, но их значения определяются только расчетным путем. Особенностью калорических параметров является то, что их изменение зависит только от начальных и конечных состояний системы. По этой причине калорические параметры состояния еще называют функциями состояния.

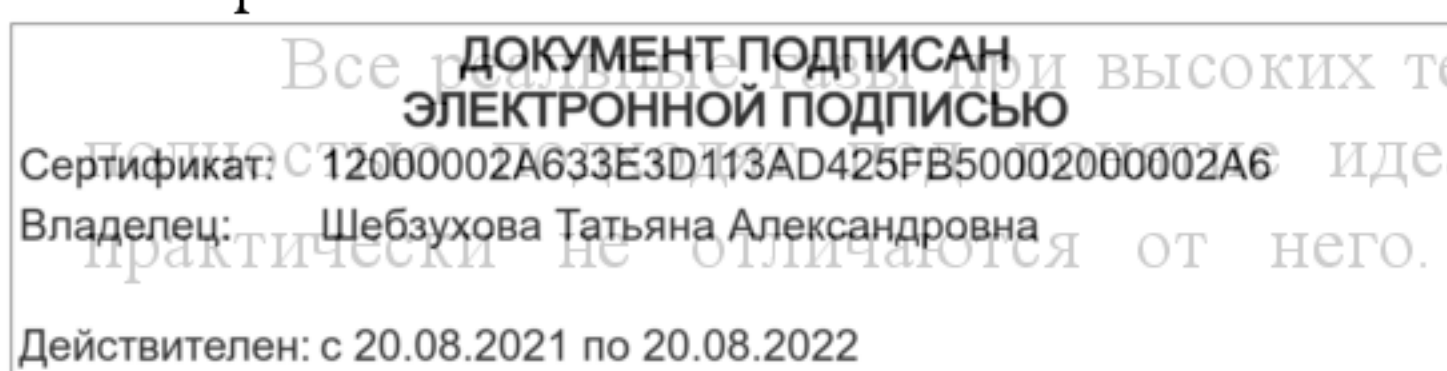
Контрольные вопросы

1. Определение термодинамической системы, характеристики систем.
2. Давление как параметр состояния системы.
3. Температура как параметр состояния системы.
4. Раскройте сущность понятия энергии и ее составляющих для термодинамической системы.
5. Калорические параметры состояния системы.
6. Что в термодинамике понимается под теплотой и работой процесса? Их обозначения и единицы измерения?
7. Проанализируйте аналитическое выражение первого закона термодинамики. Приведите примеры его применения.
8. Запишите аналитическое выражение второго закона термодинамики и поясните величины, входящие в него.
9. Что понимают под термическим КПД, какие потери он учитывает?

Тема 2. Свойства систем и процессы в них

Под идеальным понимают газ, в котором силы межмолекулярного взаимодействия отсутствуют, а сами молекулы рассматриваются как материальные точки.

При высоких температурах и малых давлениях почти все газы ведут себя как идеальные газы, и по своим свойствам практически не отличаются от него. Введение понятия идеального газа



Каналы, в которых газовый поток увеличивает свою скорость, называются соплами. Каналы, скорость в которых уменьшается, именуют диффузорами. Геометрическая форма сопел может быть различной. Это зависит от того, каково внешнее воздействие на газовый поток.

В 1948 г. профессор А.А. Вулис получил зависимость, выражающую связь геометрии сопла с характером внешнего воздействия на поток.

Контрольные вопросы

1. Проанализируйте уравнения энергии в тепловой и механической формах.
2. Поясните, какие параметры называются параметрами торможения.
3. Какие параметры считаются критическими и как они вычисляются?
4. Выведите и проанализируйте уравнение скорости движения газа в канале переменного сечения.
5. Объясните, что понимается под скоростью звука и как она вычисляется.
6. Запишите и проанализируйте уравнение массового расхода газа через канал.

Тема 4. Теплопроводность. Конвективный теплообмен

Теплообмен – это самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры. Температурным полем называют совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого пространства в некоторый фиксированный момент времени.

Если в заданный момент времени в точках рассматриваемого пространства температура имеет неодинаковые значения, то такое поле температур называют неоднородным.

По числу координат, от которых зависит температура, различают трех-, двух- и одномерные температурные поля.

Если температурное поле имеет неизменные значения температур во времени, то оно называется стационарным.

В рассматриваемый момент времени в пространстве теплообмена имеются точки с одинаковой температурой.

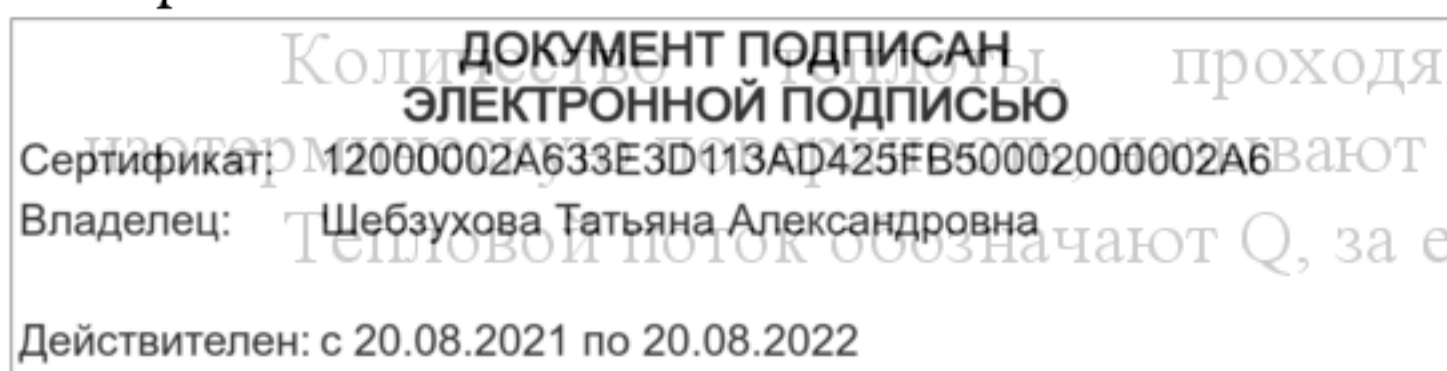
Геометрическое место этих точек образует поверхность, которую называют изотермической поверхностью.

Пересечение изотермических поверхностей плоскостью дает на этой плоскости семейство изотермических линий – изотерм.

Так как в одной и той же точке не может быть двух различных температур, то изотермические поверхности и изотермы не пересекаются.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность, называют тепловым потоком.

Тепловой поток обозначают Q , за единицу принят Дж/с или ватт.



Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, именуют плотностью теплового потока.

Коэффициент пропорциональности λ учитывает влияние физических свойств вещества на интенсивность распространения теплоты в нем, его называют коэффициентом теплопроводности. За единицу λ принят Вт/(м К).

Числовое значение коэффициента теплопроводности определяет количество теплоты, проходящей через единицу изотермической поверхности в единицу времени, при условии, что $\text{grad } T = 1$.

Величина λ зависит от химического состава, физического строения и состояния вещества. Для большинства материалов значение коэффициента теплопроводности определены опытным путем и приведены в справочных таблицах.

Конвективный теплообмен

Под тепловой конвекцией (от лат. conviction – перемещение, доставка) понимают теплообмен, осуществляемый макроскопическими элементами жидкой или газообразной среды при их перемещении.

В теплоносителе с неоднородным полем температур при вынужденном или естественном перемещении макроскопических элементов наряду с конвекцией происходит процесс переноса тепла теплопроводностью.

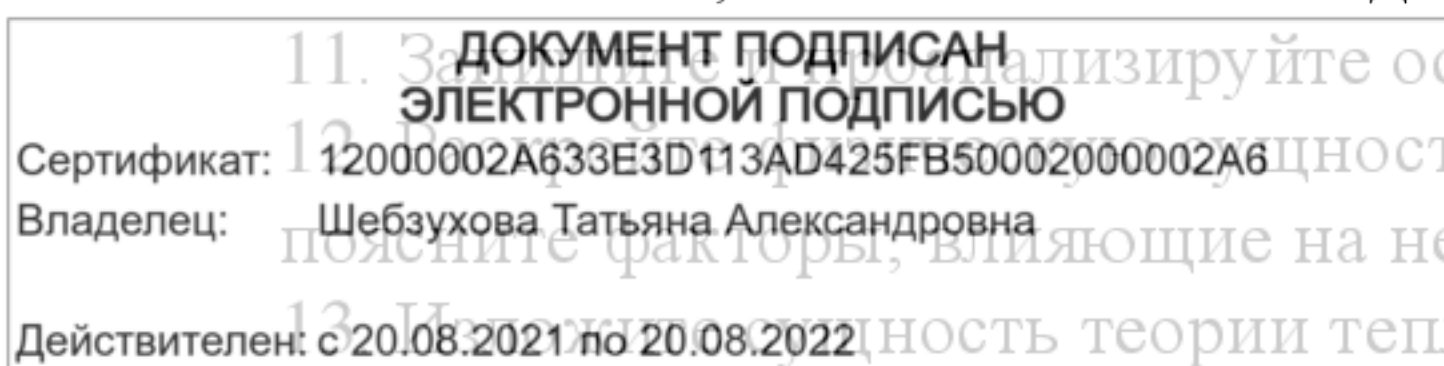
Совместный процесс переноса теплоты конвекций и теплопроводностью называют конвективным теплообменом.

Конвективный теплообмен протекает как внутри теплоносителя, так и на границах его соприкосновения с поверхностями обтекаемых тел.

Конвективный теплообмен между теплоносителем и поверхностью обтекаемого тела называют теплоотдачей.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под теплообменом? Объясните известные Вам виды теплообмена.
2. Поясните, что понимается под температурным полем?
3. Дайте определение температурного градиента.
4. Запишите основной закон теплопроводности и проанализируйте его.
5. Раскройте физическую сущность коэффициентов теплопроводности и температуропроводности.
6. Сформулируйте условия однозначности.
7. Поясните зависимость изменения температуры по толщине плоской однослойной стенки при стационарной теплопроводности.
8. Запишите выражение для вычисления плотности теплового потока для плоской многослойной стенки.
9. Что такое конвективный теплообмен?
10. Поясните, что понимается под теплоотдачей.
11. Запишите и проанализируйте основной закон теплоотдачи.
12. Поясните факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи и его зависимость от скорости течения теплоносителя.
13. Изложите сущность теории теплового подобия.



14. Что понимается под критериальным уравнением?
15. Напишите выражения и объясните сущность известных Вам критериев теплового подобия.
16. Поясните, как вычисляется коэффициент теплоотдачи.

Тема 5. Лучистый теплообмен. Теплопередача

Лучистый теплообмен – самый распространенный в природе процесс переноса теплоты. Исключительная роль принадлежит этому виду теплообмена в развитии флоры и фауны на нашей планете и эволюции Вселенной. Расчет лучистых потоков проводится в камерах сгорания энергетических установок и в системах теплоснабжения ряда объектов сельскохозяйственного производства.

Тепловое излучение – это процесс распространения части внутренней энергии излучающего тела посредством электромагнитных волн со скоростью около 300 000 км/ч. Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные материальные частицы. Излучение обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами. Корпускулярность состоит в том, что лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями – квантами или фотонами. Испускаемый фотон это частица материи, обладающая энергией и электромагнитной массой. Большинство твердых и жидких тел создает непрерывный спектр длин волн в диапазоне $\lambda = 0 \dots \infty$, из которого существенным в теплообмене считается инфракрасный ($\lambda = (0,8 \cdot 10^{-6} \dots 0,8 \cdot 10^{-3})$ м).

Теплообмен лучистой энергией между телами системы или системами называют лучистым теплообменом.

Тепловое излучение свойственно всем телам, и каждое тело излучает и поглощает энергию при любой температуре, даже близкой к абсолютному нулю. Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности. Непрозрачные твердые тела и жидкости поглощают и излучают энергию своей поверхностью; полупрозрачные тела, а также газы и пары характеризуются объемным характером излучения.

Энергия излучения, испускаемая произвольной поверхностью в единицу времени по всевозможным направлениям и по всем длинам волн спектра, называется полным лучистым потолком.

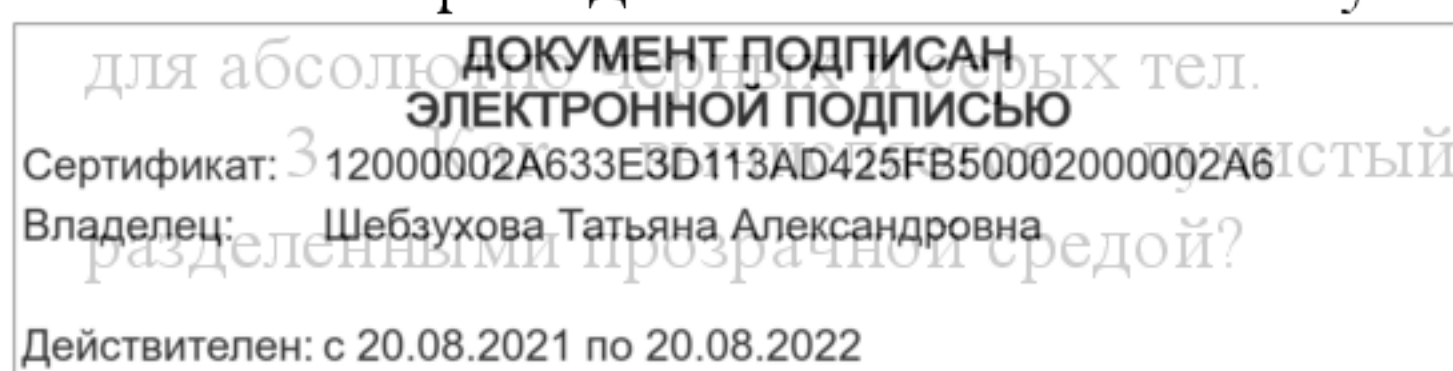
Полный, или интегральный, лучистый поток обозначается через Φ , за единицу лучистого потока принят ватт.

Интегральный лучистый поток, испускаемый с единицы поверхности, носит название излучательной способности тела.

Контрольные вопросы

1. Поясните, что понимается под лучистым теплообменом.
2. Приведите зависимость излучательной способности от температуры

тепловой поток между телами,



4. Изобразите и поясните характер изменения температуры от одного теплоносителя к другому через разделяющую их плоскую стенку.
5. Запишите и проанализируйте уравнение теплопередачи.
6. Покажите известные Вам способы интенсификации теплопередачи.

Тема 6. Охлаждения систем

В различного рода технологических процессах, в быту возникает необходимость снижать температуру систем до значений ниже температуры окружающей среды.

Процесс снижения температуры системы называют охлаждением.

Охлаждение – это, согласно второму закону термодинамики, самопроизвольный процесс переноса энергии в форме теплоты от тела с определенной температурой к телу с более низкой температурой. Перенос энергии может проходить теплопроводностью (граничные условия IV рода), теплоотдачей и лучистым теплообменом. Следовательно, для охлаждения объекта необходимо иметь окружающую его среду с температурой ниже температуры этого объекта.

В зависимости от требуемой конечной температуры охлаждаемого объекта можно подобрать соответствующую среду в естественных условиях. Например, снижение температуры охлаждающей жидкости в радиаторе ДВС происходит в процессе теплообмена с окружающим воздухом; для охлаждения некоторых продуктов питания в естественных условиях используют воду скважин, водоемов, размещение в заглубленном грунте и т. д. Для охлаждения и хранения пищевых продуктов ранее использовали ледники (погреба), заполненные заготовленным зимой льдом. Из-за ограниченной длительности процесса (лед меняет свое агрегатное состояние и теряет охлаждающую способность) и большой трудоемкости заготовки льда данный способ теряет актуальность.

Низкотемпературную среду можно создать и искусственно. К искусственным относится охлаждение "сухим" льдом, с помощью сжиженных газов, термоэлектрическим способом, при помощи холодильных машин.

Термоэлектрический способ охлаждения основан на известном эффекте Пельтье.

Самым распространенным искусственным способом охлаждения систем является способ с применением холодильных машин.

Машина, осуществляющая искусственное охлаждение объекта и поддержание его температуры ниже температуры окружающей среды с помощью подводимой энергии, называется холодильной машиной (ХМ).

Контрольные вопросы

1. Объясните направление процессов переноса теплоты при охлаждении

тел систем	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
2. Показите известные Вам естественные и искусственные способы охлаждения.	ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6	
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна	
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

3. Покажите известность термоэлектрического способа охлаждения.

4. При каких условиях при дросселировании газа снижается его температура?
5. Как вычисляется температура газа при его адиабатном расширении?
6. Поясните эффект Хильше-Ранка.

Тема 7. Хладагенты и хладоносители

Идеальным циклом холодильных машин является обратный цикл Карно. Рабочее тело ХМ именуют хладагентом.

Хладагент (refrigerants): вещество, существующее в жидкой и/или в газообразной стадиях, используемое для переноса теплоты в холодильных системах (ГОСТ Р ИСО 17584-2015).

Общие требования к хладагентам:

- экологическая безопасность;
- низкая стоимость производства;
- малая плотность и вязкость;
- минусовую по шкале Цельсия температуру кипения при атмосферном давлении;
- низкое давление конденсации;
- малый удельный объем в газообразной фазе;
- химическую пассивность к металлам и материалам изоляции;
- химическая стойкость;
- негорючесть;
- малая способность проникать через неплотности;
- способность растворять воду и т.д.

В зависимости от назначения холодильной установки, ее принципа действия, выбранного хладагента эти требования удовлетворяются в той или иной степени.

Международным стандартом ИСО 817 «Органические хладагенты» установлены цифровые обозначения хладагентов в технической документации на холодильное оборудование, хладагенты, масла, тару, приборы.

Стандарт допускает несколько обозначений хладагентов:

- условное (символическое, например, R 22);
- торговое (марка, например, хладон 22);
- химическое название (дифторхлорметан),;
- химическая формула (CHF_2Cl).

Условное обозначение состоит из символа (латинской буквы R – refrigerant – хладагент) и определяющего числа.

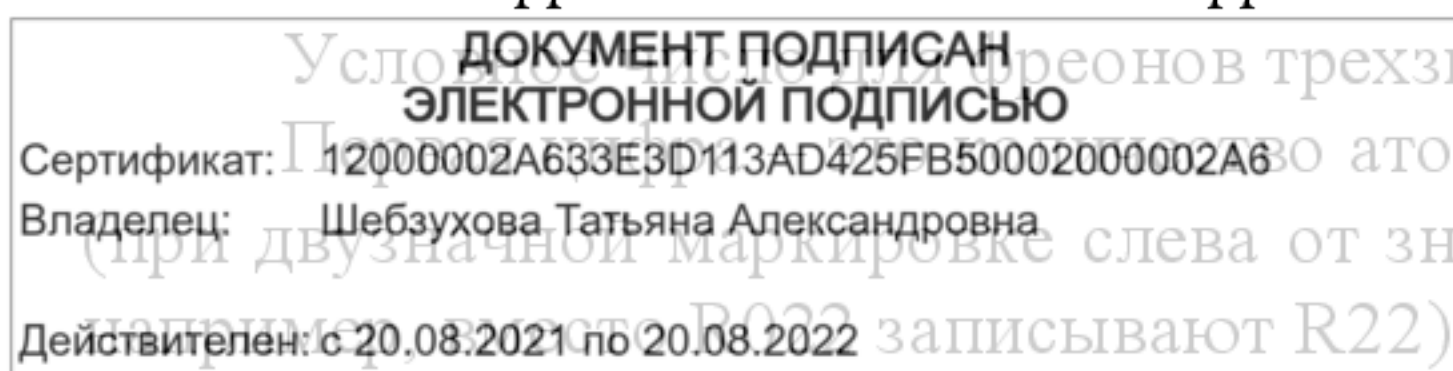
Для фреонов (хлор-фтор-углеводородов) определяющее число указывает количество атомов хлора, фтора и углерода в химической формуле, для других хладагентов – условно принятая цифра.

Расшифровка обозначения фреонов

Условное обозначение фреонов трехзначное.

Первая цифра – количество атомов углерода с прибавлением единицы (при двузначной маркировке слева от значащей цифры не проставляется нуль,

вторая цифра – количество атомов хлора (записывают R22).



Вторая цифра – количество атомов водорода, за вычетом единицы.

Третья цифра – количество атомов фтора;

Количество атомов хлора подсчитывается по остаточному принципу с учетом валентности углерода, равной четырем.

Например: запишем химическую формулу фреона R22.

R022: $C = 0 + 1 = 1$; $H = 2 - 1 = 1$; $F = 2$; $Cl = 4 - 3 = 1$. Отсюда CHF_2Cl .

По числу атомов углерода видно, какой углеводород принят за основу, для CHF_2Cl – это CH_4 – метан, в котором два атома водорода замещены атомами фтора, а один – атомом хлора.

При наличии у фреонов изомеров, наиболее симметричный из них обозначается определяющим номером, а у последующих, все более несимметричных, к номеру добавляются буквы a, b и т.д.

В состав фреона может входить бром, тогда после основного номера ставится буква B, а за ней число атомов брома: CF_2Br_2 – R12B2.

В качестве рабочих тел используются азеотропные смеси, составляемые из двух фреонов. Например, азеотропную смесь, состоящую из 48,8% R22 по массе и 51,2% R115 называют хладоном R502.

Хладагентам неорганического происхождения (аммиак, вода, воздух и др.) присвоены номера, равные их молярной массе, увеличенной на 700. Так обозначение воды R718, воздуха R729.96

Практическое использование фреонов особых сложностей не вызывает: они нетоксичны, негорючие. Однако, при работе с ними необходимо соблюдать меры предосторожности:

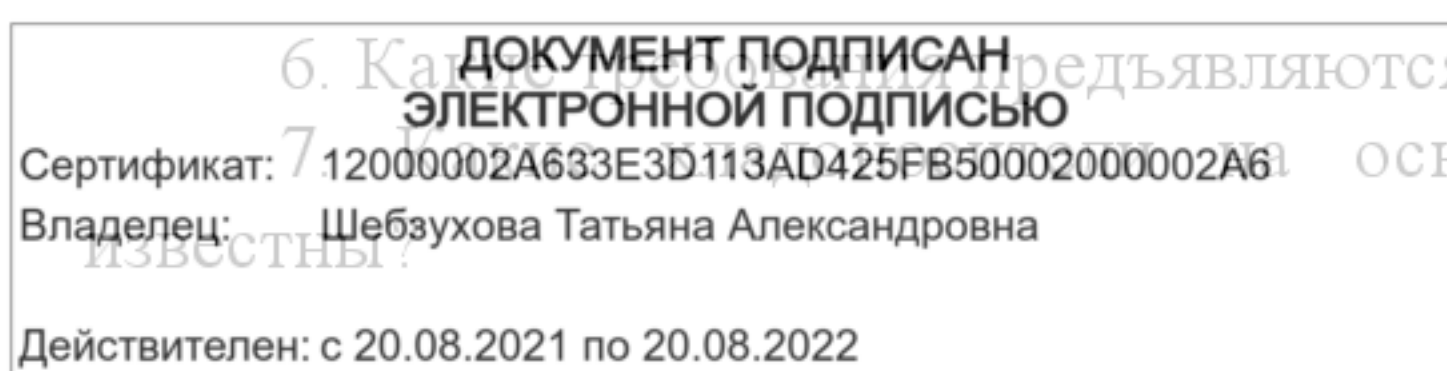
- плотность фреонов выше плотности воздуха, отсюда в закрытых помещениях пары фреона вытесняют воздух, что может привести к удушью;
- соприкосновение паров фреона с открытым пламенем или горячей металлической поверхностью приводит к его разложению с выделением токсичных газов;
- контакт незащищенной кожей человека с жидким фреоном вызывает обморожение;
- недопускается нагрев и повреждения баллонов при перевозке и хранении фреонов.

Контрольные вопросы

1. Изложите требования к рабочему телу холодильной машины.
2. Состав фреонов и их условное обозначение.
3. Как по марке фреона определить его химический состав?
4. Расскажите об особенностях фазовых переходов рабочих тел холодильных машин.
5. Поясните, как определяются параметры хладагента по диаграмма состояния?

6. Какими свойствами должны обладать хладагенты к хладоносителям?

7. Какими свойствами должны обладать хладоносители к хладагентам? Основе этиленгликолевого спирта Вам известны?



Тема 8. Циклы холодильных машин

В настоящее время низкие температуры в основном создаются искусственным путем с затратой энергии. Машина, осуществляющая искусственное охлаждение с помощью подводимой энергии, называется холодильной машиной.

В холодильных машинах осуществляется переход теплоты от тел, менее нагретых, к телам, более нагретым в результате осуществления обратного цикла. Холодильные машины характеризуются следующими показателями: холодильный эффект, холодильная мощность, холодильный коэффициент.

Холодильный эффект – это количество теплоты (q_2), отводимое от охлаждаемого объекта одним килограммом хладагента.

Количество теплоты, отводимое от охлаждаемого объекта в единицу времени, называют холодильной мощностью.

Использование в качестве хладагента воздуха при всех его термодинамических несовершенствах (отсутствие энергоёмких фазовых переходов, невысокая теплоемкость и др.) привлекает доступностью, безопасностью (в том числе и экологической), возможностью непосредственной подачи в охлаждаемое помещение (т.е. реализации открытого цикла).

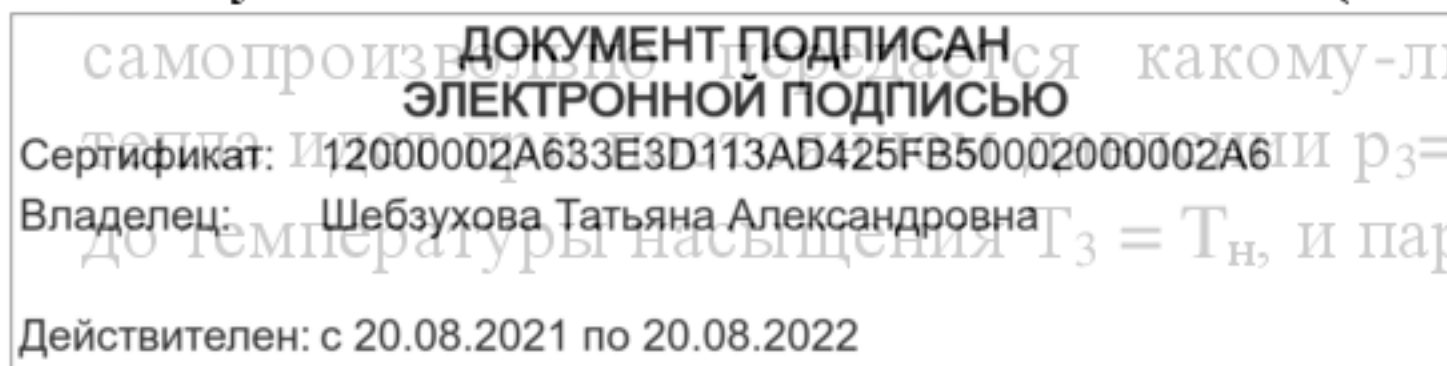
В воздушных холодильных машинах (ВХМ) в следствие невысокой теплоемкости рабочего тела необходимо иметь значительные его массовые расходы. Отсюда в схемах ВХМ предпочтение отдается динамическим компрессорам. Для снижения температуры рабочего тела проще всего использовать эффект дросселирования, однако более высокое значение холодильного коэффициента обеспечивает применение турбодетандеров.

Рабочим телом паровых компрессорных холодильных машин являются пары различных веществ: аммиака, углекислоты, сернистого ангидрида, фреонов. Удельная холодильная мощность таких веществ высокая, что позволяет выполнять холодильные машины компактными и удобными в эксплуатации. Особенностью циклов данных холодильных машин является то, что подвод тепла к холодильному агенту протекает в процессе его кипения, а отвод – в основном в процессе конденсации. Сухой насыщенный пар хладагента с давлением p_1 , температурой T_1 , степенью сухости $x = 1$ всасывается компрессором K и адиабатно сжимается.

Степень повышения давления в компрессоре должна обеспечить превышение температуры хладагента над температурой окружающей среды или температурой охлаждающего теплоносителя.

На сжатие затрачивается работа l_0 .

Из компрессора перегретый пар с давлением p_2 и температурой T_2 поступает в теплообменник T (конденсатор), в котором теплота q_1 отводится к теплоносителю. Процесс отвода q_1 происходит при постоянном давлении $p_3 = p_2$, при этом температура уменьшается до температуры насыщения $T_3 = T_n$, и пар полностью конденсируется, $x = 0$.



Из конденсатора хладагент подается в дроссельное устройство Д. В дросселе давление хладагента снижается до величины p_4 , что приводит к снижению его температуры фазового перехода. Степень дросселирования устанавливается таковой, чтобы T_4 была меньше температуры охлаждаемого тела. Уже в дроссельном устройстве хладагент начинает закипать.

Далее парожидкостная смесь (влажный хладагент) поступает в испаритель И. В испарителе к хладагенту при неизменном его давлении подводится тепло от охлаждаемого тела. Температура хладагента не изменяется (происходит фазовый переход - выкипает жидкая фаза во влажном паре) до состояния, когда степень сухости пара достигнет величины $x=1$. Образовавшийся пар при $p_1=p_4$ и $T_1=T_4$ вновь засасывается компрессором. И цикл повторяется.

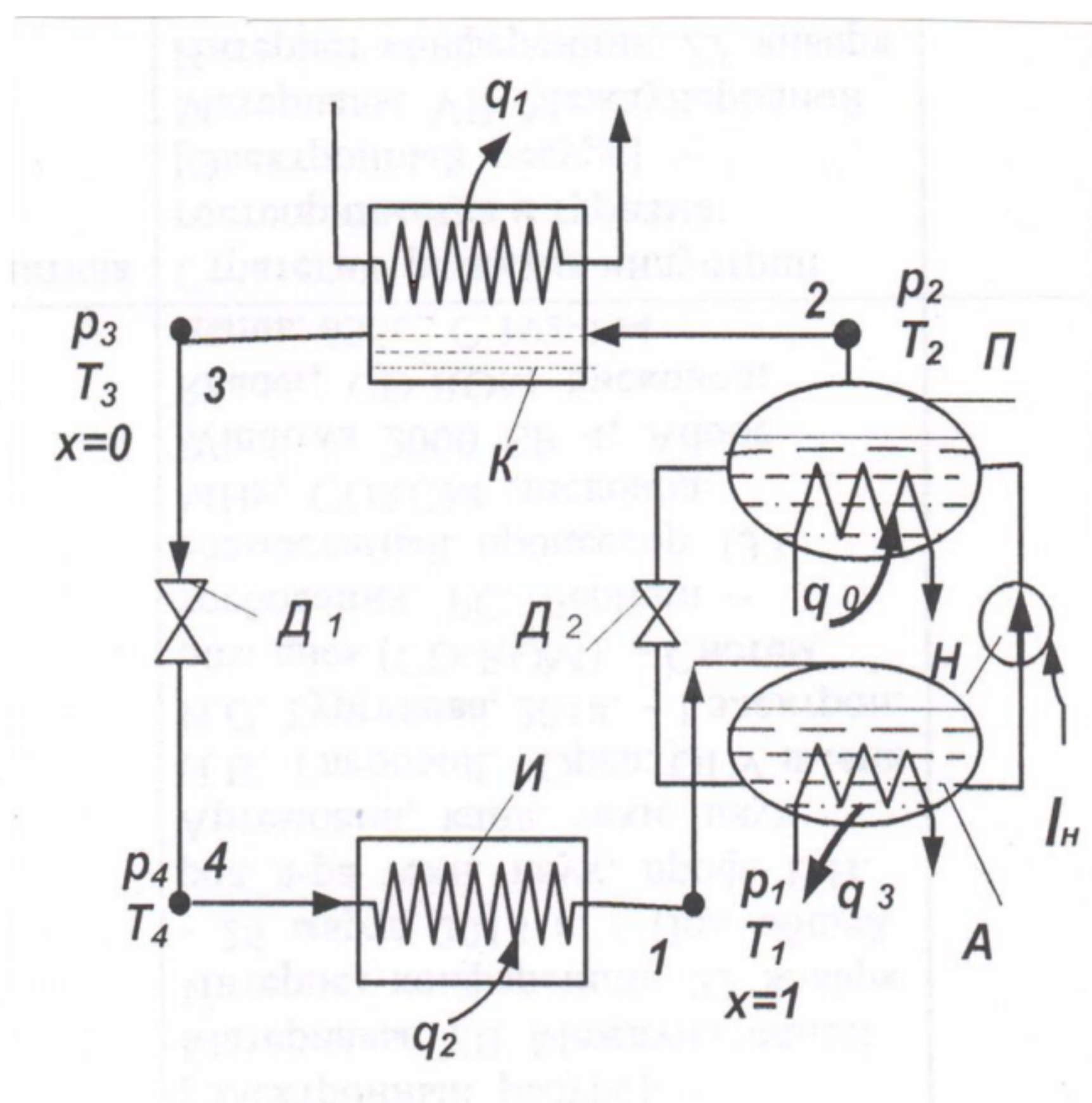


Рисунок 1 – Цикл парокомпрессионной холодильной установки

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы ПКХМ.
2. Изобразите цикл ПКХМ в Ts - координатах.
3. Что понимается под холодильным коэффициентом?
4. Какую функцию выполняет дроссель?
5. Какую функцию выполняет компрессор?
6. Изобразите цикл ВХМ в $p-v$ - координатах.
7. Поясните принцип работы теплового насоса.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Тепло- и хладотехника : учебное пособие / С. В. Бутова, В. В. Воронцов, М. Н. Шахова [и др.]. — Воронеж: Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2016. — 248 с.
2. Цветков, О. Б. Теоретические основы тепло- и хладотехники. Основы термодинамики и тепломассопереноса : учебно-методическое пособие / О. Б. Цветков, Ю. А. Лаптев. — Санкт-Петербург : Университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий, 2015. — 54 с.

Дополнительная литература

1. Тепломассообмен в установках кондиционирования воздуха: методические указания : [16+] / сост. П.Т. Крамаренко, С.С. Козлов, И.П. Грималовская ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет и др. — Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), 2013. — 39 с.
2. Буянов, О. Н. Тепло- и хладоснабжение предприятий пищевой промышленности: учебное пособие / О. Н. Буянов. — Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2006. — 282 с. — ISBN 5-89289-412-6. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт].
3. Кораблев, В. А. Лабораторный практикум по курсу теория тепло- и массообмена: учебное пособие / В. А. Кораблев, Д. А. Минкин, А. В. Шарков. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. — 37 с. — ISBN 2227-8397. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022