

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Г.Л. Пятаков

## РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург  
2013

УДК 621.56

**Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Пятаков Г.Л.** Расчет горизонтального кожухотрубного испарителя холодильной установки: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 34 с.

Представлена методика расчета горизонтального кожухотрубного испарителя холодильной установки. Рассмотрены конструкции испарителей, применяемых в холодильной технике, а также хладоносители низкотемпературных систем. Приведена программа расчета испарителя на языке Фортран 77.

Предназначено для студентов всех направлений подготовки.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.И. Пекарев**

**Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом  
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Пятаков Г.Л., 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Испаритель предназначен для отвода теплоты от охлаждаемой среды – хладоносителя [1]. В качестве хладоносителей могут быть воздух, вода (для температур выше 0 °С), водные растворы солей натрия, кальция, калия, магния, спиртов, гликолей (этиленгликоль, пропиленгликоль), сахаридов, диоксид углерода, синтетические хладоносители (дилимонен, даутерм, неожел), глицерин, трихлорэтилен и др. По способу циркуляции жидкого хладоносителя различают испарители с закрытой и открытой циркуляцией. Испаритель открытого типа представляет собой трубы с находящимся внутри них холодильным агентом, которые погружены в открытый бак с жидким хладоносителем. В баке хладоноситель охлаждается и подается насосом в охлаждаемые помещения. Испарители открытого типа применяются редко. Более востребованы кожухотрубные испарители с закрытой циркуляцией хладоносителя и межтрубным (затопленные испарители) или внутритрубным кипением хладагента. В качестве холодильного агента применяют аммиак, фреоны (хладоны) и др.

В методическом указании рассмотрен пример расчета горизонтального кожухотрубного испарителя затопленного типа. В межтрубном пространстве кипит хладагент R22 (хладон 22, фреон 22). Испаритель представляет собой стальной кожух. С двух концов кожуха имеются трубные решетки. В решетках расположены развальцованные медные трубки. Трубки с наружным накатным оребрением трапециевидного профиля создают теплопередающую поверхность. К трубным решеткам крепятся крышки с патрубками для подачи и отвода хладоносителя. Внутри крышек имеются перегородки для направления потока хладоносителя. Хладоносителем в рассматриваемом примере является водный раствор хлористого натрия (рассол). Хладоноситель насосом прокачивается внутри медных труб, делая несколько ходов. Хладагент R22 кипит на внешней оребренной поверхности медных труб (в межтрубном пространстве). К стальному кожуху испарителя приварены патрубки для подачи жидкого хладона 22 (снизу) и отвода его паров (сверху).

## Принятые обозначения

$Q_0$	–	холодопроизводительность испарителя, кВт;
$t_p$	–	температура хладонносителя (рассола), °С;
$t_o$	–	температура кипения холодильного агента, °С;
$d, D$	–	диаметр, мм;
$\beta$	–	коэффициент оребрения;
$\delta$	–	толщина стенки, мм;
$F$	–	площадь теплопередающей поверхности, м <sup>2</sup> ;
$\xi$	–	массовая концентрация соли в рассоле, %;
$\theta$	–	разность температур, °С;
$\theta_m$	–	средняя логарифмическая разность температур, °С;
$\rho$	–	плотность, кг/м <sup>3</sup> ;
$\nu$	–	коэффициент кинематической вязкости, м <sup>2</sup> /с;
$\lambda$	–	теплопроводность, Вт/(м·К);
$\beta$	–	коэффициент объемного расширения, 1/К;
$Pr$	–	число Прандтля;
$Re$	–	число Рейнольдса;
$r$	–	теплота парообразования, кДж/кг;
$g$	–	ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> ;
$l$	–	определяющий размер, м;
$\alpha$	–	коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К);
$q$	–	плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> ;
$p$	–	давление, МПа, бар;
$k$	–	коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К);
$w$	–	скорость движения рассола, м/с;
$Nu$	–	число Нуссельта;
$Gr$	–	число Грасгофа;

## Индексы

'	–	состояние насыщенной жидкости;
p	–	хладонноситель (рассол);
вн	–	внутренний;

ор	–	оребранный;
з	–	замерзание;
а	–	хладагент;
н	–	наружный;
о	–	кипящий хладагент;
л	–	ламинарный;
т	–	турбулентный;
т	–	средний;
max	–	максимальный;
min	–	минимальный;
1	–	на входе в испаритель;
2	–	на выходе из испарителя.

**Цель расчета** – определение удельного теплосъема аппарата (плотности теплового потока), коэффициента теплопередачи и теплопередающей поверхности (площади поверхности аппарата).

Приложения 1–5 содержат полезные справочные данные, взятые из [2, 3]. В приложении 6 приведена в качестве примера программа расчета аппарата на языке Фортран 77.

### Исходные данные

Холодопроизводительность испарителя $Q_0$ , кВт .....	1500
Температура хладоносителя на входе в испаритель $t_{p1}$ , °С .....	–3
Температура хладоносителя на выходе из испарителя $t_{p2}$ , °С .....	–7
Температура кипения хладагента R22 $t_0$ , °С .....	–10
Размеры медной трубы:	
– внутренний диаметр $d_{вн}$ , мм .....	13,2
– диаметр трубы по основанию ребер $d_0$ , мм .....	16,5
– диаметр ребер $D$ , мм .....	21
– средняя толщина стенки трубы $\delta$ , мм .....	1
– коэффициент оребрения $\beta_{ор} = F_{ор} / F_{вн}$ .....	3,12

# РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ

## 1. Определение средней логарифмической разности температур (средний логарифмический температурный напор)

График изменения температур рассола и хладагента R22 приведен на рис. 1.

$$\theta_m = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\ln \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\min}}} = \frac{7 - 3}{\ln \frac{7}{3}} = 4,72 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где  $\theta_{\max} = t_{p1} - t_0$ ;  $\theta_{\min} = t_{p2} - t_0$ .

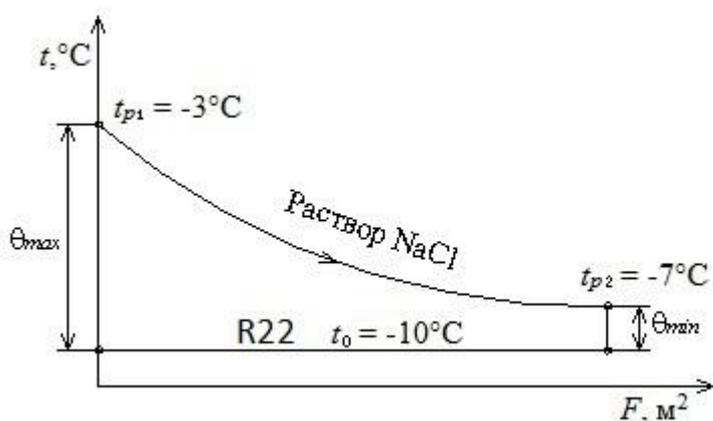


Рис. 1. Изменение температур раствора хлористого натрия и хладагента R22 в испарителе

## 2. Определение коэффициента теплоотдачи от рассола к стенке медной трубы

Для кожухотрубных испарителей с межтрубным кипением холодильного агента существует реальная опасность замерзания хладоносителя, что может привести к разрыву труб. Чтобы исключить эту опасность, целесообразно температуру замерзания хладоносителя принимать на 5–8 °C ниже температуры кипения холодильного агента. Для рассматриваемого случая температура замерзания рассола принята равной  $t_3 = -15,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Соответствующую этой температуре

концентрацию хлористого натрия в воде находим в прил. 2:  $\xi = 18,8 \%$  (по массе) [2]. Средняя температура рассола  $t_{p_m}$  равна

$$t_{p_m} = t_o + \theta_m = -10 + 4,72 = -5,28 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теплофизические свойства рассола для температуры  $t_{p_m} = -5,28 \text{ }^\circ\text{C}$  находим из прил. 2 [2]

$$\rho_{15} = 1140 \text{ кг/м}^3; \quad \nu_p = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_p = 0,542 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad Pr_p = 19,8; \\ \beta_p = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}.$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи находим число Рейнольдса, определяющее режим движения хладоносителя, по формуле

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (2)$$

где  $l$  – определяющий размер, м.

За определяющий размер  $l$  принимаем внутренний диаметр трубы,  $d_{\text{вн}}$ . Скорость движения рассола внутри трубы принимаем равной  $w = 1,5 \text{ м/с}$ . Согласно расчета число Рейнольдса равно

$$Re_p = \frac{1,5 \cdot 0,0132}{2,74 \cdot 10^{-6}} = 7226$$

Режим движения – переходный, поскольку  $2300 < Re_p < 10000$ .

Коэффициент теплоотдачи со стороны рассола  $\alpha_p$  определяем согласно [3]

$$Nu_p = \gamma Nu_T + (1 - \gamma) Nu_{\text{л}}; \quad (3)$$

$$Nu_T = 0,021 Re_T^{0,8} Pr_p^{0,43}; \quad (4)$$

$$Nu_{\text{л}} = 0,15 Re_{\text{л}}^{0,33} Pr_p^{0,43} Gr_p^{0,1}; \quad (5)$$

$$\gamma = 1 - \exp\left[1 - \frac{Re_p}{2300}\right]. \quad (6)$$

Здесь  $Nu_T$ ,  $Nu_L$  – числа Нуссельта, рассчитанные для значений чисел Рейнольдса  $Re_T = 10000$  и  $Re_L = 2300$ , соответствующих, соответственно, турбулентному и ламинарному режимам движения.

Рассчитаем число Грасгофа, принимая  $\Delta t = \theta_m$ :

$$Gr_p = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t = \frac{9,81 \cdot (0,0132)^3 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 4,72}{(2,74 \cdot 10^{-6})^2} = 4823. \quad (7)$$

Находим числа Нуссельта для турбулентного  $Nu_T$  и ламинарного  $Nu_L$  режимов

$$Nu_T = 0,021 \cdot (10000)^{0,8} (19,8)^{0,43} = 0,021 \cdot 1584,9 \cdot 3,61 = 120,17;$$

$$Nu_L = 0,15 \cdot (2300)^{0,33} (19,8)^{0,43} (4823)^{0,1} = 16,30.$$

Определяем коэффициент  $\gamma$  и число Нуссельта  $Nu_p$  для расчетного значения  $Re_p$

$$\gamma = 1 - \exp \left[ 1 - \frac{7226}{2300} \right] = 0,88;$$

$$Nu_p = 0,88 \cdot 120,17 + 0,12 \cdot 16,30 = 108,01.$$

Коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha_p = \frac{Nu_p \lambda_p}{d_{вн}} = \frac{108,01 \cdot 0,542}{0,0132} = 4435 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

### 3. Определение плотности теплового потока $q_p$ со стороны рассола к внутренней поверхности стенки медной трубы

Согласно закону Ньютона – Рихмана находим

$$q_p = \alpha_p \theta_p = 4435 \theta_p, \quad (8)$$

где  $\theta_p$  – температурный напор со стороны рассола, представляющий собой разность между средней температурой рассола и температурой внутренней поверхности трубы ( $t_{вн}$ ).

$$\theta_p = t_{pm} - t_{вн}.$$

#### 4. Определение плотности теплового потока $q_{a,op}$ со стороны хладагента R22

Используем уравнение:

$$q_{a,op} = \alpha_{a,op} \theta_a, \quad (9)$$

где  $\alpha_{a,op}$  – коэффициент теплоотдачи при кипении R22 на пучке оребренных труб,  $\theta_a$  – разность температур между температурой кипящего хладагента R22 ( $t_o$ ) и температурой наружной (оребреной) поверхности трубы ( $t_n$ )

$$\theta_a = t_n - t_o.$$

В случае кипения хладагента R22 на пучке оребренных труб для расчета  $\alpha_{a,op}$  рекомендована формула [1, 2]:

$$\alpha_{a,op} = 53,2 p_o^{0,25} q_{a,op}^{0,4}, \quad (10)$$

где  $p_o$  – давление кипения хладагента, бар.

Поскольку

$$q_{a,op} = \alpha_{a,op} \theta_a,$$

имеем

$$\alpha_{a,op} = 53,2 p_o^{0,25} (\alpha_{a,op} \theta_a)^{0,4}$$

или

$$\alpha_{a,op} = 7530_a^{0,667} p_o^{0,42}.$$

Давление насыщения R22 при  $-10\text{ }^\circ\text{C}$   $p_o = 0,3555\text{ МПа}$  (прил. 1).

Тогда:

$$\alpha_{a,op} = 753 \cdot 0,555^{\theta_a} \theta_a^{0,667} = 1283 \theta_a^{0,667}.$$

Соответственно, для плотности теплового потока  $q_{a,op}$  от наружной поверхности труб к кипящему хладагенту R22 имеем

$$q_{a,op} = \alpha_{a,op} \theta_a = 1283 \theta_a^{1,667}.$$

Заметим, что  $q_{a,op}$  отнесена к площади всей оребренной поверхности. Поскольку для медных накатных ребер коэффициент эффективности ребра близок к единице, возможно принять температуру оребренной трубы равной температуре наружной поверхности трубы  $\theta_n$ , на которой накатаны ребра.

Температурный напор  $\theta_a$  в этом случае определим как разность

$$\theta_a = t_n - t_o.$$

Зная  $\theta_a$ , имеем возможность рассчитать также плотность теплового потока, отнесенную к внутренней поверхности трубы

$$q_{a,вн} = q_{a,op} \beta_{op} = 1283 \cdot 3,12 \cdot \theta_a^{1,667} = 4002 \theta_a^{1,667}. \quad (11)$$

## 5. Определение удельной тепловой производительности испарителя $q$

В случае, когда термическим сопротивлением стенки медной трубы можно пренебречь, справедливы соотношения

$$q_{a,вн} = q_p = q, \quad (12)$$

$$\theta_a + \theta_p = \theta_m.$$

Тогда, воспользовавшись формулами (8) и (11), имеем

$$4435\theta_p = 4002\theta_a^{1,667} \quad \text{или} \quad 4435(\theta_m - \theta_a) = 4002\theta_a^{1,667}. \quad (13)$$

Задаваясь различными значениями  $\theta_a$  (на ЭВМ это возможно осуществить методом половинного деления), последовательным приближением добиваемся равенства левой и правой частей уравнения (13). В нашем случае это равенство наступает при  $\theta_a = 1,96 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\theta_p = 4,72 - 1,96 = 2,76 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Решение уравнения (13) возможно также осуществить графически. Для этого в координатах  $q - \theta_m$  строят два графика

$$\text{первый: } q_p = 4435\theta_p$$

$$\text{и второй: } q_{a,вн} = 4002\theta_a^{1,667}.$$

В точке пересечения линий, построенных по этим зависимостям, находят  $\theta_a$  и  $\theta_p$  (на линии абсцисс) и  $q$  (на ординате).

Зная  $\theta_a$ , удельную тепловую нагрузку аппарата, отнесенную к внутренней поверхности, рассчитаем согласно формуле (11)

$$q = q_{a,вн} = 4002 \cdot 1,96^{1,667} = 12256 \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловая нагрузка испарителя  $q_{op}$ , отнесенная к единице площади оребренной поверхности, будет меньше, так как имеем

$$q_{op} = q / \beta_{op} = 12256 / 3,12 = 3928 \text{ Вт/м}^2. \quad (14)$$

Значение коэффициента теплоотдачи кипящего R22 на пучке оребренных труб находим из

$$\alpha_{a,op} = \frac{3928}{1,96} = 2007 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)},$$

поскольку  $\theta_a = 1,96 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 6. Определение коэффициентов теплопередачи

Коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице площади внутренней поверхности, определяем как

$$k = q_{a, \text{вн}} / \theta_m = 2597 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (15)$$

Коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице площади оребренной поверхности, определяем, разделив  $k$  на коэффициент оребрения  $\beta_{\text{ор}}$

$$k_{\text{ор}} = k / \beta_{\text{ор}} = 835 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (16)$$

## 7. Определение площади теплопередающих поверхностей

Площадь внутренней поверхности труб находим по формуле

$$F_{\text{вн}} = \frac{Q_o}{q_{\text{вн}}} = \frac{1500 \cdot 10^3}{12256} = 122 \text{ м}^2. \quad (17)$$

Площадь наружной поверхности оребренных труб больше и равна

$$F_{\text{ор}} = F_{\text{вн}} \beta_{\text{ор}} = 361 \text{ м}^2. \quad (18)$$

Расчет поверхности теплообмена в принципе может быть уточнен, поскольку теперь известно  $\theta_p$ . Тем не менее для инженерных расчетов с учетом принятых допущений и крайне незначительным влиянием  $Nu_{\text{л}}$  на  $\alpha_p$  изменениями значений  $F$  в пределах реальной погрешности их определения можно пренебречь.

Блок-схема расчета испарителя представлена на рис. 2, а программа расчета на языке Фортран 77 – в прил. 6. Результаты расчета испарителя, полученные на ЭВМ, заносятся в файл res.dat.

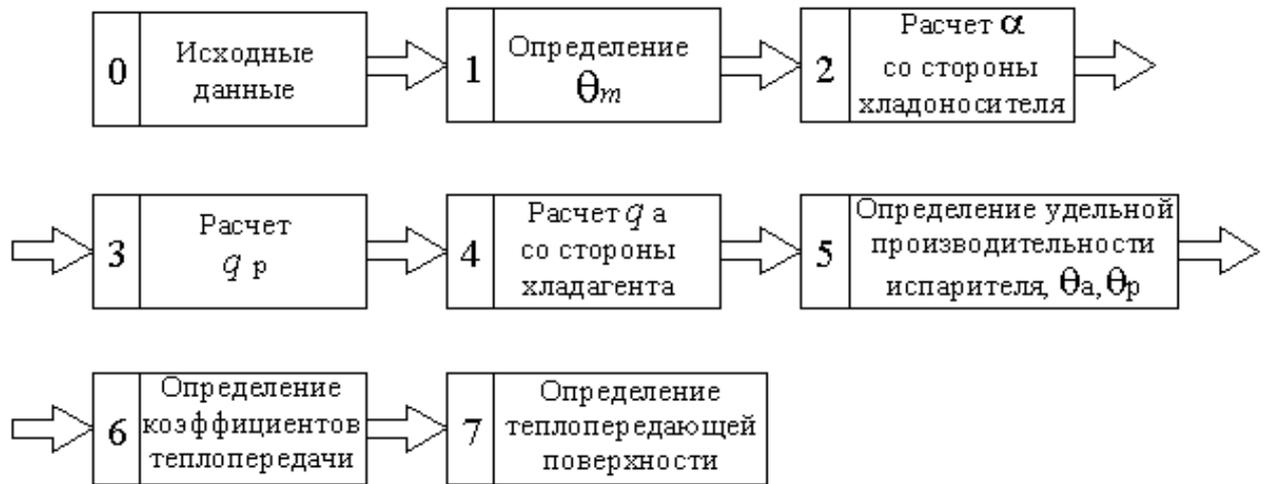


Рис. 2. Блок-схема программы расчета

**Приложение 1**  
**Теплофизические свойства кипящего хладагента R22**  
**на линии насыщения [2, 3]**

$t_a$ , °C	$p_o$ , МПа	$r$ , кДж/кг	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda'$ , Вт/(м·К)	$\nu' \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta$ , 1/К	Pr
-30	0,1640	226,4	1377	0,110	0,213	20,1	3,06
-10	0,3555	212,2	1315	0,101	0,176	24,1	2,65
10	0,6809	196,1	1248	0,091	0,151	29,1	2,44
30	1,1913	177,3	1172	0,082	0,130	37,7	2,33
40	1,5327	166,4	1130	0,078	0,119	44,9	2,27
50	1,9418	154,1	1083	0,074	0,109	55,0	2,25

**Приложение 2**

**Теплофизические свойства водного раствора**  
**хлорида натрия [2, 3]**

$\xi$ , %	$t_3$ , °C	$t_p$ , °C	$\rho_{15}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , 1/К	Pr
18,8	-15,1	20	1140	0,582	1,26	4,5	8,5
		10		0,566	1,63	4,0	11,4
		0		0,550	2,25	3,6	16,1
		-5		0,542	2,74	3,4	19,8
		-10		0,533	3,40	3,2	24,8
		-15		0,524	4,19	3,0	31,0
21,2	-18,2	20	1160	0,579	1,33	4,7	9,1
		10		0,563	1,73	4,2	12,1
		0		0,547	2,44	3,8	17,5
		-5		0,538	2,96	3,6	21,5
		-10		0,530	3,70	3,4	27,18
		-15		0,522	4,55	3,2	33,90

### Приложение 3

#### Сводка формул для определения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего хладагента

Вид кипения	Хлад-агент	Расчетная формула	Примечание
Кипение на пучке гладких горизонтальных труб [1]	R12	$\alpha_a = 14,2 q^{0,5} p_o^{0,25} \left( \frac{s}{d} \right)^{-0,45}$	$t_o = -30 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C};$ $q = 1000 - 10000 \text{ Вт/м}^2;$ $s/d = 1,15 - 2,45;$
	R22	$\alpha_a = 16,4 q^{0,5} p_o^{0,25} \left( \frac{s}{d} \right)^{-0,45}$	$p_o \text{ [бар]; } q \text{ [Вт/м}^2]$
	NH <sub>3</sub>	$\alpha_a = 9 q^{0,5} p_o^{0,15}$	$t_o = -20 \text{ }^\circ\text{C} \div 10 \text{ }^\circ\text{C};$ $s/d = 1,36; d = 25 \times 3 \text{ мм}$
Кипение на пучке оребренных труб [2]	R22	$\alpha_{a, \text{оп}} = 53,2 p_o^{0,25} q^{0,4}$ $\alpha_{a, \text{оп}} - \text{отнесен к полной оребренной поверхности}$	$q = 500 - 9000 \text{ Вт/м}^2;$ $t_o = -30 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C};$ девятирядный пучок труб с накатными ребрами; $s_p = 1,26 \text{ мм}; d_{\text{вн}} = 13,74 \text{ мм};$ $h_p = 1,31 \text{ мм};$ $p_o \text{ [бар]; } q \text{ [Вт/м}^2]$

Вид кипения	Хлад-агент	Расчетная формула	Примечание
Внутритрубное кипение [1]	R12	$\alpha_a = 23,4 q^{0,15} (w\rho)^{0,57}$	$t_o = -10 \text{ }^\circ\text{C} \div 30 \text{ }^\circ\text{C};$ $q = 1,5 - 2,5 \text{ кВт/м}^2;$
		$\alpha_a = 14,2 q^{0,5} (w\rho)^{0,2} d_{\text{вн}}^{-0,2} (t_o = -30 \text{ }^\circ\text{C})$	$q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$
		$\alpha_a = 1,045 q^{0,6} (w\rho)^{0,2} d_{\text{вн}}^{-0,2} (t_o = -10 \text{ }^\circ\text{C})$	$q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$
	R22	$\alpha_a = 32,0 q^{0,15} (w\rho)^{0,57}$	$t_o = -10 \text{ }^\circ\text{C} \div +30 \text{ }^\circ\text{C};$ $q = 1,5 - 2,5 \text{ кВт/м}^2;$
		$\alpha_a = 0,95 q^{0,6} (w\rho)^{0,2} d_{\text{вн}}^{-0,2} (t_o = -30 \text{ }^\circ\text{C})$	$q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$
		$\alpha_a = 1,17 q^{0,6} (w\rho)^{0,2} d_{\text{вн}}^{-0,2} (t_o = -10 \text{ }^\circ\text{C})$	$q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$ $w\rho = 50 - 600 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $d_{\text{вн}} = 12 \text{ мм}$ $q[\text{кВт/м}^2]; w\rho [\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}]; d[\text{м}]$
	NH <sub>3</sub>	$\alpha_a = 74 q_{\text{вн}}^{0,2} d_{\text{вн}}^{-0,2}$ (для области неразвитого кипения)	$q_{\text{вн}}$ – плотность теплового потока, отнесенная к внутренней поверхности трубы [Вт/м <sup>2</sup> ]; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы [м]

## Приложение 4

### Теплофизические свойства кипящего аммиака (R717) на линии насыщения [2, 3]

$t_o,$ °C	$p_o,$ МПа	$r,$ кДж/кг	$\rho',$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda',$ Вт/(м·К)	$\nu' \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	Pr
-30	0,1194	1359,6	677,9	0,554	0,358	1,96
-20	0,1901	1328,7	665,1	0,538	0,325	1,81
-10	0,2908	1296,1	652,0	0,522	0,298	1,69
0	0,4296	1261,5	638,5	0,5068	0,274	1,59
10	0,6153	1224,8	624,6	0,490	0,255	1,51
20	0,8578	1185,8	610,2	0,472	0,238	1,45

## Приложение 5

### Теплофизические свойства водного раствора хлорида кальция [2, 3]

$\xi,$ %	$t_s,$ °C	$t_p,$ °C	$\rho_{15},$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda,$ Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4,$ 1/К	Pr
23,8	-25,7	20	1220	0,565	1,94	4,1	12,50
		10		0,551	2,35	3,9	15,40
		0		0,538	3,13	3,7	20,80
		-10		0,523	3,63	3,5	33,00
		-20		0,511	7,77	3,3	53,80
25,7	-31,2	20	1240	0,562	2,12	4,1	13,5
		10		0,548	2,51	3,9	16,5
		0		0,535	3,43	3,7	22,7
		-10		0,521	5,40	3,5	36,6
		-15		0,514	6,75	3,4	46,3
		-20		0,508	8,52	3,3	58,5
		-25		0,501	10,40	3,2	72,0
		-30		0,494	12,00	3,1	83,0

Программа расчета испарителя  
на языке Фортран 77

```

common a,b,td,tp,st,lamda,ks,tm,ref
integer t,kk,i,tt,u
real ks,Nut,Num,Nup,j,w(2,4),alflam
real lamdp,d,k,Qo,tp1,tp2,to,dint,dbas,dreb,delt,betta
real a,b,c,f1,f2,aa,bb,m,qaint,qop,Fint,Fop,kop,kint,ref
character*26 sv1,sv2,sv3
data sv1 /'Водный раствор соли NaCl'/
data sv2 /'Водный раствор соли CaCl2'/
data w(1,1),w(1,2),w(1,3),w(1,4)/0,-0.048,0.5886,-9.1422/
data w(2,1),w(2,2),w(2,3),w(2,4)/-0.0161,0.8919,-17.8,109.86/
print*,'Программа теплового расчета кожухотрубного
испарителя'
print*,'с межтрубным кипением хладагента R22.'
7 print*,'Введите хладоноситель:'
print*,'1) Водный раствор соли NaCl;'
print*,'2) Водный раствор соли CaCl2.'
read*,ref
if (ref.EQ.1.or.ref.EQ.2) then
goto 8
else
goto 7
end if
8 print*,'Введите холодопроизводительность испарителя Qo, кВт'
read*,Qo
print*,'Введите температуру хладоносителя на входе в'
print*,'испаритель, tp1, оС'
read*,tp1
print*,'Введите температуру хладоносителя на выходе из'
print*,'испарителя tp2,оС'
read*,tp2
print*,'Введите температуру кипения хладагента R22 to, оС'
read*,to

```

```

11  print*,'Введите массовую концентрацию хладоносителя, %'
    read*,ks
    dint=0.0132
    dbas=0.0165
    dreb=0.021
    delt=0.001
    betta=3.12
    Qmax=tp1-to
    Qmin=tp2-to
    Qm=(Qmax-Qmin)/(log(Qmax/Qmin))
    tpm=to+Qm
    tm=tpm
    if (ref.EQ.1) then
        i=1
    else if (ref.EQ.2) then
        i=2
    end if
    tfr=w(i,1)*ks*ks*ks+w(i,2)*ks*ks+w(i,3)*ks+w(i,4)
    dl=abs(tfr-to)
    if (dl.LT.5) then
        print*,'Внимание! Возможно замерзание хладоносителя.'
        print*,'Температура замерзания хладоносителя, tзам=',tfr,' оС'
        goto 11
    end if
    call fal(visc,lamdp,Prp,bp,ks,tm,Po,to,ref,dens)
    Rep=(1.5*dint)/visc
    Ret=10000
    Rel=2300
    Nut=0.021*Ret**0.8*Prp**0.43
    Grp=9.81*dint**3*bp*Qm/visc**2
    Num=0.15*Rel**0.33*Prp**0.43*Grp**0.1
    j=1-exp(1-Rep/2300)
    Nup=j*Nut+(1-j)*Num
    alfp=Nup*lamdp/dint
    acc=0.001
    a=-1000
    b=1000

```

```

1  c=(a+b)/2
   qaint=752.5*Po**0.42*beta*c**1.667
   qqp=alfp*(Qm-c)
   if(qqp.lt.qaint) then
   b=c
   else
   a=c
   end if
   f3=qqp-qaint
   if (abs(f3).LT.acc) then
   else
   goto 1
   end if
   Qa=c
   Qp=Qm-Qa
   m=752.5*Po**0.42*beta
   alflam=m*c
   qaint=m*c**1.667
   qop=qaint/betta
   kint=qaint/Qm
   kop=kint/betta
   Fint=Qo*1000/qaint
   Fop=Fint*betta
   print*, 'Размеры медной трубы:'
   print*, 'Внутренний диаметр трубы dвн=', dint, ' м'
   print*, 'Диаметр трубы по основанию ребер do=', dbas, ' м'
   print*, 'Диаметр ребер D=', dreb, ' м'
   print*, 'Средняя толщина стенки трубы delta=', delt, ' м'
   print*, 'Коэффициент оребрения betta=Fop/Fвн=3.12'
   do g=1,17
   print*, "
   end do
   print*, 'Нажмите "Enter".'
   read*
   print*, 'Вычисляем среднюю логарифмическую разность'
   print*, 'температур.'
   print*, 'Qm=(Qmax-Qmin)/(log(Qmax/Qmin))'

```

```

print*, 'Средняя логарифмическая разность температур, Qm='
print*, ', Qm,' оС'
print*, 'Определяем теплофизические свойства хладоносителя'
print*, 'при средней температуре хладоносителя tpm:'
print*, 'tpm=to+Qm=', tpm, ' оС'
print*, 'Нажмите "Enter".'
read*
print 22, ks, dens, visc, lamdp, Prp, bp, Po
22  format (2x,
* /2x, 'Массовая концентрация соли в растворе, кси=', f9.3, ' %',
* /2x, 'Плотность хладоносителя, ро=', f9.3, ' кг/м3',
* /2x, 'Кинематическая вязкость хладоносителя, v=', d15.4, ' м2/с',
* /2x, 'Теплопроводность хладоносителя, lamda=', f9.3, ' Вт/м*К',
* /2x, 'Число Прандтля хладоносителя, Pr=', f9.3, ",
* /2x, 'Коэффициент объемного расширения хладоносителя, В=',
* d15.4, ' 1/К',
* /2x, 'Давление кипения R22, Po=', f9.3, ' бар')
print*, 'Нажмите "Enter".'
read*
do g=1,25
print*, "
end do
print*, 'Расчитаем значения критериев подобия со стороны'
print*, 'хладоносителя:'
print*, 'Число Рейнольдса Rep=(w*l)/v'
print*, 'Определяющий размер l-внутренний диаметр трубы, двн.'
print*, 'Принимаем скорость движения хладоносителя внутри'
print*, 'труб равной 1,5 м/с.'
print*, 'Находим Rep=', Rep
print*, 'Режим течения-переходный, поскольку 2300<Re<10000'
print*, 'Критерий Грасгофа, Grp=((g*l3)/v2)*В*dt'
print*, 'Находим, Grp=', Grp
print*, 'Нуссельт турбулентный, Nut=0.021*Ret0.8*Prp0.43'
print*, 'Находим Nut=', Nut
print*, 'Нуссельт ламинарный, Nul=0.15*Rel0.33*Prp0.43'
* Grp0.1
print*, 'Находим Nul=', Nul

```

```

print*,Nut,Nul-числа Нуссельта, рассчитанные для  $Re_t=10000$  и
print*, $Re_l=2300$ , соответствующие, соответственно, '
print*,турбулентному и ламинарному режиму.'
print*,Нуссельт хладоносителя,  $Nu_p=j*Nu_t+(1-j)*Nul'$ 
print*,Вычислим коэффициент  $j$ .'
print*, $j=1-\exp(1-Re_p/2300)$ '
print*,Находим  $j=j$ 
print*,Нуссельт хладоносителя,  $Nu_p='Nu_p$ 
print*,Нажмите "Enter".'
read*
print*,Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны хладо-
print*,носителя,  $alpha_p=Nu_p*lamdp/d_{вн}$ 
print*,Коэффициент теплоотдачи со стороны хладо-
print*,носителя,  $alpha_p='alpha_p'$ , Вт/(м2*К)'
print*,Плотность теплового потока  $q_p$  от хладоносителя к '
print*,внутренней поверхности стенки трубы.'
print*, $q_p=alpha_p*Q_p='alpha_p'*Q_p'$ 
print*,где  $Q_p$ -разность температур между средней температу-
print*,рой хладоносителя ( $t_{pm}$ ) и температурой внутренней'
print*,поверхности трубы ( $t_{вн}$ ).
print*,Плотность теплового потока  $q_{aop}$  от наружной '
print*,поверхности трубы к кипящему R22:'
print*, $q_{aop}=(alpha_{aop})*Q_a'$ 
print*,где  $Q_a$ -разность температур между температурой'
print*,кипящего R22 ( $t_o$ ) и температурой наружной'
print*,(оребреной) поверхности медных труб ( $t_n$ ).
print*, $Q_a=t_n-t_o$ 
print*,Коэффициент теплоотдачи,  $alpha_{aop}$  при кипении'
print*,R22 на пучке оребренных труб определим по формуле:'
print*, $alpha_{aop}=53.2*Po^{0.25}*q_a^{0.4}$ 
print*,Нажмите "Enter".'
read*
print*,Имеем  $alpha_{aop}=752.5*Q_a^{0.667}*Po^{0.42}$ 
gm=752.5*(Po)**0.42
print*,Получаем  $alpha_{aop}='gm,*Q_a^{0.667}$ 
print*,Откуда  $q_{aop}='gm,*Q_a^{1.667}$ 
print*,Учитывая, что'

```

```

gn=gm*beta
print*,'qa,вн=qa,op*beta=',gn,'*Qa^1.667'
print*,' Определим разность температур Qa между температурой'
print*,'кипящего R22 (to) и температурой наружной(оребреной)'
print*,'поверхности медных труб (tn).'
```

Qa определяется исходя из равенства удельных тепловых потоков либо по графику, либо расчетом, например, методом половинного деления.

```

print*,'Пренебрегая термическим сопротивлением стенки, имеем'
print*,'qавн=qр=q и '
print*,'Qa+Qр=Qm, '
print*,'где qавн-плотность теплового потока, отнесенная к '
print*,'внутренней поверхности трубы, Вт/м^2;'
print*,'Нажмите "Enter".'
```

Методом половинного деления находим разность температур Qa между температурой кипящего R22 (to) и температурой наружной (оребреной) поверхности медных труб (tn).

```

print*,'Qa=',с,' оC'
print*,'Разность температур Qр между средней температу-'
print*,'рой хладоносителя (tpm) и температурой внутренней'
print*,'поверхности трубы (tвн).'
```

Qр=Qm-Qa, Qр, оC

```

print*,'Плотность теплового потока qр от хладоносителя к '
print*,'внутренней поверхности стенки трубы:'
print*,'qр=alfр*Qр=',qqr,' Вт/м^2'
print*,'Коэффициент теплоотдачи, alfa,op при кипении'
print*,'R22 на пучке оребренных труб.'
```

alfa,op=q/Qa

```

print*,'alfa,op=',alfлам,' Вт/м^2*К'
print*,'Нажмите "Enter".'
```

Плотность теплового потока, отнесенная к внутренней поверхности стенки медной трубы, qавн=',qaint,' Вт/м2

Плотность теплового потока от наружной поверхности медной трубы к R22 равна'

```

print*, 'qop=qaint/betta=', qop, ' Вт/м2'
print*, 'Нажмите "Enter".'
read*
print*, 'Расчитаем коэффициенты теплопередачи испарителя:'
print*, 'Коэффициент теплопередачи испарителя квн,отнесенный'
print*, 'к единице площади внутренней поверхности труб.'
print*, 'квн=qвн/Qm=', kint, ' Вт/м2*К'
print*, 'Коэффициент теплопередачи испарителя кор, отнесенный'
print*, 'к единице площади оребренной поверхности труб.'
print*, 'кор=квн/betta=', kor, ' Вт/м2*К'
print*, 'Нажмите "Enter".'
read*
print*, 'Результатом теплового расчета кожухотрубного'
print*, ' испарителя является определение площади'
print*, 'теплообменной поверхности.'
print*, 'Площадь внутренней поверхности труб, Fвн'
print*, 'Fвн=Qo/qвн=', Fint, ' м2'
print*, 'Площадь наружной поверхности оребренных'
print*, 'труб, Fop'
print*, 'Fop=Fвн*betta=', Fop, ' м2'
print*, 'Нажмите "Enter".'
read*
if (ref.le.1) then
sv3=sv1
else
sv3=sv2
end if
open(12, file='res.dat')
write(12, *) 'Программа теплового расчета кожухотрубного'
write(12, *) 'испарителя с межтрубным кипением'
write(12, *) 'хладагента R22.'
write(12, *) ''
write(12, *) 'Хладоноситель-', sv3, '! '
write(12, *) 'Холодопроизводительность испарителя Qo=', Qo, '
write(12, *) 'кВт'
write(12, *) 'Температура хладоносителя на входе'
write(12, *) 'в испаритель tp1=', tp1, ' оС'

```

```

write(12,*) 'Температура хладоносителя на выходе'
write(12,*) 'из испарителя tp2=',tp2,' оС'
write(12,*) 'Температура кипения хладагента R22 to=',to,' оС'
write(12,*) 'Массовая концентрация соли равна',ks,' %'
write(12,*) 'Размеры медной трубы:'
write(12,*) 'Внутренний диаметр трубы dвн=',dint,' м'
write(12,*) 'Диаметр трубы по основанию ребер do=',dbas,' м'
write(12,*) 'Диаметр ребер D=',dreb,' м'
write(12,*) 'Средняя толщина стенки трубы delta=',delt,' м'
write(12,*) 'Коэффициент оребрения betta=Fop/Fвн=3.12'
write(12,*) 'Вычисляем среднюю логарифмическую'
write(12,*) 'разность температур.'
write(12,*) 'Qm=(Qmax-Qmin)/(log(Qmax/Qmin))'
write(12,*) 'Средняя логарифмическая разность'
write(12,*) 'температур, Qm=',Qm,' оС'
write(12,*) 'Определяем теплофизические свойства'
write(12,*) 'хладоносителя'
write(12,*) 'при средней температуре хладоносителя'
write(12,*) 'tpm=to+Qm=',tpm,' оС'
write(12,23) ks,dens,visc,lamdp,Prp,bp,Po

```

23 format (2x,

```

* /2x,'Массовая концентрация соли в растворе, кси=',f9.3,' %',
* /2x,'Плотность хладоносителя, ро=',f9.3,' кг/м3',
* /2x,'Кинематическая вязкость хладоносителя, v=',d15.4,' м2/с',
* /2x,'Теплопроводность хладоносителя, lamda=',f9.3,' Вт/м*К',
* /2x,'Число Прандтля, Pr=',f9.3,"
* /2x,'Коэффициент объемного расширения хладоносителя, В=',
* d15.4,' 1/К',
* /2x,'Давление кипения R22, Po=',f9.3,' бар')
write(12,*) 'Расчитаем значения критериев подобия со стороны'
write(12,*) 'хладоносителя:'
write(12,*) 'Число Рейнольдса Rep=(w*1)/v'
write(12,*) 'Определяющий размер l-внутренний диаметр трубы,'
write(12,*) 'dвн.'
write(12,*) 'Принимаем скорость движения хладоносителя'
write(12,*) 'внутри' write(12,*) 'труб равной 1,5 м/с.'
write(12,*) 'Находим Rep=',Rep

```

```

write(12,*) 'Режим течения-переходный, поскольку'
write(12,*) '2300<Re<10000'
write(12,*) 'Критерий Грасгофа, Grp=((g*l^3)/v^2)*B*dt'
write(12,*) 'Находим, Grp=',Grp
write(12,*) 'Нуссельт турбулентный,Nut=0.021*Ret^0.8*Prp^0.43'
write(12,*) 'Находим Nut=',Nut
write(12,*) 'Нуссельт ламинарный'
write(12,*) 'Nul=0.15*Rel^0.33*Prp^0.43*Grp^0.1'
write(12,*) 'Находим Nul=',Num
write(12,*) 'Nut,Nul-числа Нуссельта, рассчитанные для'
write(12,*) 'Ret=10000 и Rel=2300, соответствующие, '
write(12,*) 'соответственно, турбулентному и ламинарному'
write(12,*) 'режиму.'
write(12,*) 'Нуссельт хладоносителя, Nup=j*Nut+(1-j)*Nul'
write(12,*) 'Вычислим коэффициент j.'
write(12,*) 'j=1-exp(1-Rep/2300)'
write(12,*) 'Находим j=',j
write(12,*) 'Нуссельт хладоносителя, Nup=',Nup
write(12,*) 'Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны'
write(12,*) 'хладоносителя, alfp=Nup*lamdp/dвн'
write(12,*) 'Коэффициент теплоотдачи со стороны хладо-'
write(12,*) 'носителя, alfp=',alfp,' Вт/(м2*К)'
write(12,*) 'Плотность теплового потока qр от хладоносителя к '
write(12,*) 'внутренней поверхности стенки трубы:'
write(12,*) 'qр=alfp*Qр=',alfp,'*Qр,'
write(12,*) 'где Qр-разность температур между средней'
write(12,*) 'температурой хладоносителя (tpm) и температурой'
write(12,*) 'внутренней поверхности трубы (tвн).'

```

```

write(12,*) 'по формуле:  $\alpha_{op}=53.2 \cdot P_o^{0.25} \cdot q_a^{0.4}$ '
write(12,*) 'Имеем  $\alpha_{op}=752.5 \cdot Q_a^{0.667} \cdot P_o^{0.42}$ '
write(12,*) 'Получаем  $\alpha_{op}=\beta_{gm} \cdot Q_a^{0.667}$ '
write(12,*) 'Откуда  $q_a,op=\beta_{gm} \cdot Q_a^{1.667}$ '
write(12,*) 'Учитывая, что'
write(12,*) ' $q_a,вн=q_a,op \cdot \beta_{gn} \cdot Q_a^{1.667}$ '
write(12,*) 'Определим разность температур  $Q_a$  между'
write(12,*) 'температурой кипящего R22 ( $t_o$ ) и температурой'
write(12,*) 'наружной (оребреной) поверхности медных'
write(12,*) 'труб ( $t_n$ ). '
write(12,*) ' $Q_a$  определяется исходя из равенства удельных'
write(12,*) 'тепловых потоков либо по графику, либо расчетом, '
write(12,*) 'например, методом половинного деления.'
write(12,*) 'Пренебрегая термическим сопротивлением'
write(12,*) 'стенки,имеем'
write(12,*) ' $q_{avn}=q_p=q$  и '
write(12,*) ' $Q_a+Q_p=Q_m$ , '
write(12,*) 'где  $q_{avn}$ -плотность теплового потока, отнесенная к '
write(12,*) 'внутренней поверхности трубы, Вт/м2;'
write(12,*) 'Методом половинного деления находим'
write(12,*) 'разность температур  $Q_a$  между температурой'
write(12,*) 'кипящего R22 ( $t_o$ ) и температурой наружной'
write(12,*) '(оребреной) поверхности медных труб ( $t_n$ ). '
write(12,*) ' $Q_a=$ ,с, ' оС'
write(12,*) 'Разность температур  $Q_p$  между средней температу-'
write(12,*) 'рой хладоносителя ( $t_{pm}$ ) и температурой внутренней'
write(12,*) 'поверхности трубы ( $t_{вн}$ )'
write(12,*) ' $Q_p=Q_m-Q_a=$ , $Q_p$ , ' оС'
write(12,*) 'Плотность теплового потока  $q_p$  от хладоносителя к '
write(12,*) 'внутренней поверхности стенки трубы.'
write(12,*) ' $q_p=\alpha_{fp} \cdot Q_p=$ , $q_{qp}$ , ' Вт/м2'
write(12,*) 'Коэффициент теплоотдачи,  $\alpha_{op}$  при кипении'
write(12,*) 'R22 на пучке оребранных труб.'
write(12,*) ' $\alpha_{op}=q/Q_a=$ , $\alpha_{flam}$ , ' Вт/м2*К'
write(12,*) 'Плотность теплового потока, отнесенная к '
write(12,*) 'внутренней поверхности стенки медной'
write(12,*) 'трубы, $q_{avn}=$ , $q_{aint}$ , ' Вт/м2'

```

```

write(12,*) 'Плотность теплового потока от наружной'
write(12,*) 'поверхности медной трубы к R22'
write(12,*) 'qop=qavn/betta=',qop,' Вт/м2'
write(12,*) 'Расчитаем коэффициенты теплопередачи'
write(12,*) 'испарителя:'
write(12,*) 'Коэффициент теплопередачи испарителя'
write(12,*) 'квн,отнесенный к единице площади внутренней'
write(12,*) 'поверхности труб.'
write(12,*) 'квн=qвн/Qm=',kint,' Вт/м2*К'
write(12,*) 'Коэффициент теплопередачи испарителя кор, '
write(12,*) 'отнесенный к единице площади оребренной'
write(12,*) 'поверхности труб.'
write(12,*) 'кор=квн/betta=',kor,' Вт/м2*К'
write(12,*) 'Результатом теплового расчета кожухотрубного '
write(12,*) 'испарителя является определение площади '
write(12,*) 'теплообменной поверхности.'
write(12,*) 'Площадь внутренней поверхности труб, Fвн'
write(12,*) 'Fвн=Qo/qвн=',Fint,' м2'
write(12,*) 'Площадь наружной поверхности оребренных'
write(12,*) 'труб, Fop'
write(12,*) 'Fop=Fвн*betta=',Fop,' м2'
close (12)
end
subroutine fal(visc,lamdp,Prp,bp,ks,tm,Po,to,ref,dens)
real*4 lamdp,visc,d(10),p(2),dens
real ks,tm,n,m,s
real*4 x(10),x1(10),x2(10),x3(10),x4(10),x5(10),x6(10),x7(10),
* x8(10),x9(10)
real*4 z(2),z1(2),z2(2),z3(2)
open (5,file='prop.dat')
read(5,600) (x(h),x1(h),x2(h),x3(h),x4(h),x5(h),x6(h),x7(h),
* x8(h),x9(h),h=1,10)
600 format(4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4,
* 4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4,4x,d14.4)
close(12)
open (5,file='propRef.dat')
read(5,700) (z(hh),z1(hh),z2(hh),z3(hh),hh=1,1)

```

```

700 format(4x,d11.4,4x,d11.4,4x,d11.4,4x,d11.4)
close(12)
do w=1,1
p(w)=z3(w)*to*to*to+z2(w)*to*to+z1(w)*to+z(w)
end do
Po=p(1)
do jj=1,10
d(jj)=x(jj)+x1(jj)*ks+x2(jj)*tm+x3(jj)*ks*ks+x4(jj)*ks*tm+
* x5(jj)*tm*tm+x6(jj)*ks*ks*ks+x7(jj)*tm*ks*ks+x8(jj)*ks*tm*tm+
* x9(jj)*tm*tm*tm
end do
if (ref.EQ.1) then
s=1
else if (ref.EQ.2) then
s=6
end if
visc=d(s)*1e-6
lamdp=d(s+1)
Prp=d(s+2)
dens=d(s+3)
bp=d(s+4)*1e-4
continue return
end

```

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов и др. Под общей ред. Г.Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.
2. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, Н.А. Бучко – М.: Колос, 1995. – 303 с.
3. **Цветков О.Б., Клецкий А.В., Лаптев Ю.А.** Практикум по термодинамике и теплопередаче. Ч.1. Свойства рабочих веществ и материалов холодильной и криогенной техники и систем кондиционирования воздуха. – СПб.: СПбТИХП, 1993. – 99 с.
4. **Данилова Г.Н., Бучко Н.А., Тихонов А.В.** Тепловой расчет горизонтальных кожухотрубных аппаратов с применением ЭВМ. – Л.: ЛТИХП, 1989. – 32 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ.....	6
П р и л о ж е н и е 1. Теплофизические свойства кипящего хладагента R22 на линии насыщения [2, 3].....	14
П р и л о ж е н и е 2. Теплофизические свойства водного раствора хлорида натрия [2, 3].....	14
П р и л о ж е н и е 3. Сводка формул для определения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего хладагента.....	15
П р и л о ж е н и е 4. Теплофизические свойства кипящего аммиака (R717) на линии насыщения [2, 3].....	17
П р и л о ж е н и е 5. Теплофизические свойства водного раствора хлорида кальция [2, 3].....	17
П р и л о ж е н и е 6. Программа расчета испарителя на языке Фортран 77.....	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	30

Цветков Олег Борисович  
Лаптев Юрий Александрович  
Пятаков Георгий Леонидович

# РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие

*Ответственный редактор*

Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*

Т.В. Белянкина

*Компьютерная верстка*

Ю.А. Лаптев

И.В. Гришко

*Дизайн обложки*

Н.А. Потехина

*Печатается*

*в авторской редакции*

---

Подписано в печать 30.10.2013. Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 2,0

Тираж 170 экз. Заказ № С 81

---

СПбНИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9