

25.95

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



**Кафедра теоретических основ
тепло- и хладотехники**

**РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО
КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ
ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Методические указания
для студентов специальностей
140401, 140504, 190603, 260601, 260602, 220301,
260202, 260204, 260301, 260303, 260504, 280201

Второе издание, исправленное



Санкт-Петербург
2008

Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Пятаков Г.Л. Расчет горизонтального кожухотрубного испарителя холодильной установки: Метод. указания для студентов спец. 140401, 140504, 190603, 260601, 260602, 220301, 260202, 260204, 260301, 260303, 260504, 280201. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 31 с.

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

Рецензент
Доктор техн. наук, проф. А.Г. Долотов

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2003, 2008

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, нежел), глицерин, трихлорэтилен и др. По способу циркуляции жидкого хладоносителя различают испарители с закрытой и открытой циркуляцией. Один из видов испарителей с закрытой циркуляцией – кожухотрубные. Жидкий хладоноситель в кожухотрубных испарителях протекает под напором, создаваемым насосом. Испаритель открытого типа представляет собой трубы с находящимся внутри них холодильным агентом, которые погружены в открытый бак с жидким хладоносителем. В баке циркуляция хладоносителя создается с помощью мешалки. Подобные конструкции еще встречаются, но довольно редко. Более распространены кожухотрубные испарители с закрытой циркуляцией хладоносителя и межтрубным (затопленные испарители) или внутритрубным кипением хладагента. В качестве холодильного агента применяют аммиак, фреоны (хладоны), пропан, изобутан.

В методическом указании рассмотрен пример расчета горизонтального кожухотрубного испарителя затопленного типа, в межтрубном пространстве которого кипит хладагент R22 (хладон 22, фреон 22). Испаритель представляет собой стальной кожух. К кожуху с двух концов приварены трубные решетки, в которых расположены развальцованные медные трубки внутренним диаметром 13,2 мм. Трубки выполнены с наружным накатным оребрением трапециевидного профиля. Оребренные трубки являются теплопередающей поверхностью. К трубным решеткам крепятся крышки с патрубками для подачи и отвода хладоносителя. Внутри крышек имеются перегородки для направления потока хладоносителя. Хладоносителем 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 хладоносителя (рассола), °С;
t_0	– температура кипения холодильного агента, °С;
d, D	– диаметр, мм;
β	– коэффициент оребрения;
δ	– толщина стенки, мм;
F	– площадь теплопередающей поверхности, м ² ;
ξ	– массовая концентрация соли, %;
θ	– разность температур, °С;
θ_m	– средняя логарифмическая разность температур, °С;
ρ	– плотность, кг/м ³ ;
ν	– коэффициент кинематической вязкости, м ² /с;
λ	– коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
β	– коэффициент объемного расширения, 1/К;
Pr	– число Прандтля;
Re	– число Рейнольдса;
r	– теплота парообразования, кДж/кг;
Nu	– число Нуссельта;
Gr	– число Грасгофа;
g	– ускорение свободного падения, м/с ² ;
l	– определяющий размер, м;
α	– коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К);
q	– удельный тепловой поток (плотность теплового потока), Вт/м ² ;
p	– давление, МПа, бар;
k	– коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К);
w	– скорость движения рассола, м/с.

Индексы

'	– состояние насыщенной жидкости;
p	– хладоноситель (рассол);
вн	– внутренний;
ор	– оребренный;
з	– замерзание;
а	– хладагент;
н	– наружный;
о	– кипящий хладагент;
л	– ламинарный;
т	– турбулентный;
м	– 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 прил. 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 δ , 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 $\theta_{\max} = t_{p1} - t_0$; $\theta_{\min} = t_{p2} - t_0$.

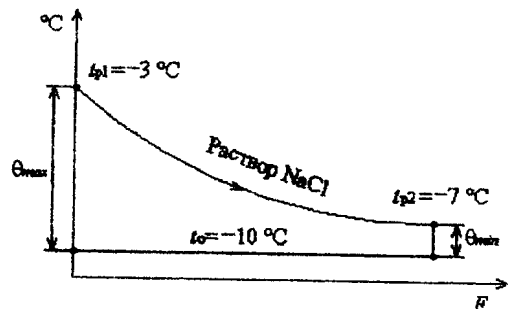


Рис. 1. Изменение температур раствора хлористого натрия и хладагента R22 в испарителе

2. Определение коэффициента теплоотдачи от рассола к стенке медной трубы

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

$$t_{p_m} = t_0 + \theta_m = -10 + 4,72 = -5,28 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплофизические свойства рассола для этой 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 необходимо знать число Рейнольдса, определяющее режим движения хладоносителя. Число Рейнольдса находим 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 $w = 1,5 \text{ м/с}$.

Рассчитываем число Рейнольдса

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

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

Коэффициент теплоотдачи со стороны рассола α_p определяем согласно [3]

$$Nu_p = \gamma Nu_T + (1 - \gamma) Nu_L; \quad (3)$$

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

$$Nu_L = 0,15 Re_L^{0,33} Pr_p^{0,43} Gr_p^{0,1}; \quad (5)$$

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

Здесь Nu_T , Nu_d – числа Нуссельта, рассчитанные для значений чисел Рейнольдса $Re_T = 10000$ и $Re_d = 2300$, 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

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

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

Определяем коэффициент γ и число Нуссельта Nu_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 от рассола к внутренней поверхности стенки медной трубы

Согласно закону Ньютона – Рихмана

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

где θ_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 следующее уравнение:

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

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

$$\alpha_{a,op} = 753 \theta_a^{0,667} p_o^{0,42}.$$

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

Тогда:

$$\alpha_{a,op} = 753 (3,555)^{0,42} \theta_a^{0,667} = 1283 \theta_a^{0,667}.$$

Соответственно, для плотности теплового потока $q_{a,op}$ от наружной поверхности трубы 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 (t_n), на которой накатаны ребра.

Температурный напор θ_a в этом случае определим как разность

$$\theta_a = t_n - t_o.$$

Зная θ_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

$$q_{a,вн} = q_p = q \quad (12)$$

и

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

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 θ_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

$$\theta_a = 1,96 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{и} \quad \theta_p = 4,72 - 1,96 = 2,76 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Решение уравнения (13) возможно 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 θ_a и θ_p (на линии абсцисс) и q (на ординате).

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

$$q = q_{a,вн} = 4002 \cdot (1,957)^{1,667} = 12256 \text{ Вт/м}^2.$$

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

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

Откуда площадь наружной поверхности оребренных труб будет 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 θ_p . Тем не менее для инженерных расчетов с учетом принятых допущений и крайне незначительным влиянием Nu_d на α_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.

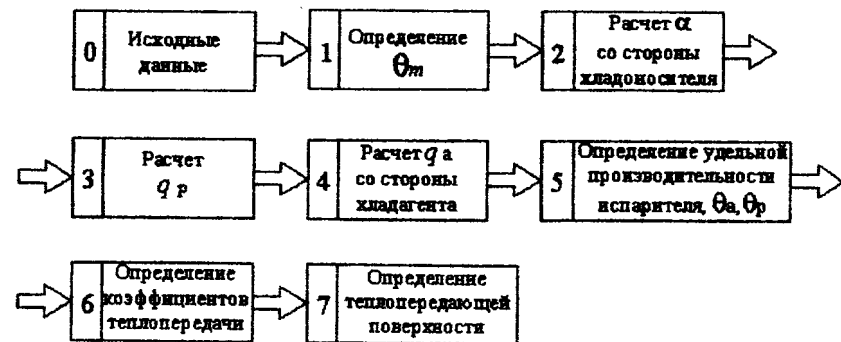


Рис. 2. Блок-схема программы расчета

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.

Приложение 1

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

$t_{\text{с}}$ °C	$p_{\text{с}}$ МПа	r , кДж/кг	ρ' , кг/м ³	λ' , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	β , 1/К	Pr
-30	0,1640	226,4	1377	0,110	0,213	20,1	2,97
-10	0,3555	212,2	1315	0,101	0,175*	24,1	2,61
10	0,6809	196,1	1248	0,091	0,151	29,1	2,47
30	1,1913	177,3	1172	0,082	0,130	37,7	2,36

Приложение 2

Теплофизические свойства водного раствора хлорида натрия [2, 3]

ξ %	$t_{\text{с}}$ °C	$t_{\text{р}}$ °C	ρ_{15} , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /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	-	19,8
		-10		0,533	3,40	3,2	24,8
		-15		0,524	4,19	-	31,0

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	$\alpha_{\text{в, оп}} = 14,2 q^{0,5} p_0^{0,25} \left(\frac{s}{d}\right)^{-0,45}$	$t_0 = -30 \text{ } ^\circ\text{C} - 0 \text{ } ^\circ\text{C};$ $q = 1000 - 10000 \text{ Вт/м}^2;$ $s/d = 1,15 - 2,45;$ p_0 [бар]; q [Вт/м ²]
	R22	$\alpha_{\text{в, оп}} = 16,4 q^{0,5} p_0^{0,25} \left(\frac{s}{d}\right)^{-0,45}$ $\alpha_{\text{в}} = 9 q^{0,5} p_0^{0,15}$	
Кипение на пучке оребренных труб [2]	NH ₃	$\alpha_{\text{в, оп}} = 53,2 p_0^{0,25} q^{0,4}$	$t_0 = -20 \text{ } ^\circ\text{C} + 10 \text{ } ^\circ\text{C};$ $s/d = 1,36; d = 25 \times 3 \text{ мм}$ $q = 500 - 9000 \text{ Вт/м}^2;$ $t_0 = -30 \text{ } ^\circ\text{C} - 0 \text{ } ^\circ\text{C};$ 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_0 [бар]; q [Вт/м ²]
	R22	$\alpha_{\text{в, оп}} - \text{отнесен к полной оребренной поверхности}$	

Вид кипения	Хлад-агент	Расчетная формула	Примечание
	R12	$\alpha_4 = 23,4 q^{0,15} (np)^{0,57}$ $\alpha_4 = 14,2 q^{0,5} (np)^{0,2} d_{вн}^{0,2} (t_0 = -30 \text{ } ^\circ\text{C})$ $\alpha_4 = 1,045 q^{0,6} (np)^{0,2} d_{вн}^{0,2} (t_0 = -10 \text{ } ^\circ\text{C})$	$t_0 = -10 \text{ } ^\circ\text{C} + 30 \text{ } ^\circ\text{C};$ $q = 1,5 - 2,5 \text{ кВт/м}^2;$ $q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$ $q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2.$
Внутрирубное кипение [1]	R22	$\alpha_4 = 32,0 q^{0,15} (np)^{0,57}$ $\alpha_4 = 0,95 q^{0,6} (np)^{0,2} d_{вн}^{0,2} (t_0 = -30 \text{ } ^\circ\text{C})$ $\alpha_4 = 1,17 q^{0,6} (np)^{0,2} d_{вн}^{0,2} (t_0 = -10 \text{ } ^\circ\text{C})$	$t_0 = -10 \text{ } ^\circ\text{C} + 30 \text{ } ^\circ\text{C};$ $q = 1,5 - 2,5 \text{ кВт/м}^2;$ $q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$ $q = 2,5 - 20 \text{ кВт/м}^2;$ $np = 50 - 600 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ $d_{вн} = 12 \text{ мм}$ $q [\text{кВт/м}^2]; np [\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}]; d_{вн}$
	NH ₃	$\alpha_6 = 74 q_{вн}^{0,2} d_{вн}^{0,2}$ (для области неравнотного кипения)	$q_{вн}$ — плотность теплового потока, отнесенная к внутренней поверхности трубы [Вт/м ²]; $d_{вн}$ — внутренний диаметр трубы [м]

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

t_0 , °C	$P_{св}$, МПа	r , кДж/кг	ρ' , кг/м ³	λ' , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /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

Теплофизические свойства водного раствора
хлорида кальция [2, 3]

ζ , %	t_0 , °C	t_p , °C	ρ_{15} , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /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

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, B=',
   * 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 Reр=(w*l)/v'
   print*, 'Определяющий размер l-внутренний диаметр трубы, dвн.'
   print*, 'Принимаем скорость движения хладоносителя внутри'
   print*, 'труб равной 1,5 м/с.'
   print*, 'Находим Reр=', Reр
   print*, 'Режим течения-переходный, поскольку 2300<Re<10000'
   print*, 'Критерий Грасгофа, Grр=((g*l^3)/v^2)*B*dt'
   print*, 'Находим, Grр=', Grр
   print*, 'Нуссельт турбулентный, Nut=0.021*Ret^0.8*Prр^0.43'
   print*, 'Находим Nut=', Nut
   print*, 'Нуссельт ламинарный, Nул=0.15*Rel^0.33*Prр^0.43*
   * Grр^0.1'
   print*, 'Находим Nул=', Num

```

```

print*,Nut,Нуль-числа Нуссельта, рассчитанные для Re=10000 и'
print*,Rel=2300, соответствующие, соответственно,'
print*,турбулентному и ламинарному режиму.'
print*,Нуссельт хладоносителя, Nup=j*Nut+(1-j)*Нуль'
print*,Вычислим коэффициент j.'
print*,j=1-exp(1-Rep/2300)'
print*,Находим j=',j
print*,Нуссельт хладоносителя, Nup=',Nup
print*,Нажмите "Enter".'
read*
print*,Определяем коэффициент теплоотдачи со стороны хладо-
print*,носителя, alfp=Nup*lamdp/dвн'
print*,Коэффициент теплоотдачи со стороны хладо-
print*,носителя, alfp=',alfp,' Вт/(м2*К)'
print*,Плотность теплового потока qр от хладоносителя к '
print*,внутренней поверхности стенки трубы:'
print*,qr=alfp*Qp=',alfp,'*Qp,'
print*,где Qp-разность температур между средней температу-
print*,рой хладоносителя (trm) и температурой внутренней'
print*,поверхности трубы (tвн).'
print*,Плотность теплового потока qaор от наружной '
print*,поверхности трубы к кипящему R22:'
print*,qaор=(alfa,ор)*Qa,'
print*,где Qa-разность температур между температурой'
print*,кипящего R22 (to) и температурой наружной'
print*,(оребреной) поверхности медных труб (tn).'
print*,Qa=tn-to'
print*,Коэффициент теплоотдачи, alfa,ор при кипении'
print*,R22 на пучке оребренных труб определим по формуле:'
print*,alfa,ор=53.2*Po^0.25*qa^0.4'
print*,Нажмите "Enter".'
read*
print*,Имеем alfa,ор=752.5*Qa^0.667*Po^0.42'
gm=752.5*(Po)**0.42
print*,Получаем alfa,ор=',gm,'*Qa^0.667'
print*,Откуда qa,ор=',gm,'*Qa^1.667'
print*,Учитывая,что'

```

```

gn=gm*beta
print*,qa,вн=qa,ор*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).'
print*,Qa определяется исходя из равенства удельных тепловых'
print*,потоков либо по графику, либо расчетом, например,'
print*,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".'
read*
print*,Методом половинного деления находим'
print*,разность температур Qa между температурой кипящего'
print*,R22 (to) и температурой наружной (оребреной) '
print*,поверхности медных труб (tn).'
print*,Qa=',c,' оС'
print*,Разность температур Qр между средней температу-
print*,рой хладоносителя (trm) и температурой внутренней'
print*,поверхности трубы (tвн).'
print*,Qр=Qm-Qa=',Qр,' оС'
print*,Плотность теплового потока qр от хладоносителя к '
print*,внутренней поверхности стенки трубы:'
print*,qr=alfp*Qp=',qрr,' Вт/м^2'
print*,Коэффициент теплоотдачи, alfa,ор при кипении'
print*,R22 на пучке оребренных труб.'
print*,alfa,ор=q/Qa'
print*,alfa,ор=',alfam,' Вт/м^2*К'
print*,Нажмите "Enter".'
read*
print*,Плотность теплового потока, отнесенная к внутренней'
print*,поверхности стенки медной трубы, qавн=',qaint,' Вт/м2'
print*,Плотность теплового потока от наружной'
print*,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 kop, отнесенный'
print*, 'к единице площади оребренной поверхности труб.'
print*, 'kop=qвн/betta=', kop, ' 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, ' оC'

```

```

write(12,*) 'Температура хладоносителя на выходе'
write(12,*) 'из испарителя tp2=', tp2, ' оC'
write(12,*) 'Температура кипения хладагента R22 to=', to, ' оC'
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, ' оC'
write(12,*) 'Определяем теплофизические свойства'
write(12,*) 'хладоносителя'
write(12,*) 'при средней температуре хладоносителя'
write(12,*) 'tpm=to+Qm=', tpm, ' оC'
write(12,23) ks, dens, visc, lamdp, Prp, bp, Po
23 format (2x,
* /2x, 'Массовая концентрация соли в растворе, ksi=', 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,*) 'qr=alfp*Qp=',alfp,'*Qp,'
write(12,*) 'где Qр-разность температур между средней'
write(12,*) 'температурой хладоносителя (tpm) и температурой'
write(12,*) 'внутренней поверхности трубы (tвн).'
write(12,*) 'Плотность теплового потока qaор от наружной'
write(12,*) 'поверхности трубы к кипящему R22:'
write(12,*) 'qaор=(alfa,ор)*Qa,'
write(12,*) 'где Qa-разность температур между температурой'
write(12,*) 'кипящего R22 (to) и температурой наружной'
write(12,*) '(оребреной) поверхности медных труб (tn).'
write(12,*) 'Qa=tn-to'
write(12,*) 'Коэффициент теплоотдачи, alfa,ор при кипении'
write(12,*) 'R22 на пучке оребранных труб определим'

```

```

write(12,*) 'по формуле: alfa,ор=53.2*Po^0.25*qa^0.4'
write(12,*) 'Имеем alfa,ор=752.5*Qa^0.667*Po^0.42'
write(12,*) 'Получаем alfa,ор=',gm,'*Qa^0.667'
write(12,*) 'Откуда qa,ор=',gm,'*Qa^1.667'
write(12,*) 'Учитывая,что'
write(12,*) 'qa,вн=qa,ор*beta=',gn,'*Qa^1.667'
write(12,*) 'Определим разность температур Qa между'
write(12,*) 'температурой кипящего R22 (to) и температурой'
write(12,*) 'наружной (оребреной) поверхности медных'
write(12,*) 'труб (tn).'
write(12,*) 'Qa 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,*) 'qавн=qр=q и '
write(12,*) 'Qa+Qр=Qm, '
write(12,*) 'где qавн-плотность теплового потока, отнесенная к'
write(12,*) 'внутренней поверхности трубы, Вт/м^2;'
write(12,*) 'Методом половинного деления находим'
write(12,*) 'разность температур Qa между температурой'
write(12,*) 'кипящего R22 (to) и температурой наружной'
write(12,*) '(оребреной) поверхности медных труб (tn).'
write(12,*) 'Qa=',c,' оС'
write(12,*) 'Разность температур Qр между средней температу-'
write(12,*) 'рой хладоносителя (tpm) и температурой внутренней'
write(12,*) 'поверхности трубы (tвн)'
write(12,*) 'Qр=Qm-Qa=',Qp,' оС'
write(12,*) 'Плотность теплового потока qр от хладоносителя к'
write(12,*) 'внутренней поверхности стенки трубы:'
write(12,*) 'qr=alfp*Qр=',qqr,' Вт/м^2'
write(12,*) 'Коэффициент теплоотдачи, alfa,ор при кипении'
write(12,*) 'R22 на пучке оребранных труб.'
write(12,*) 'alfa,ор=q/Qa=',alfam,' Вт/м^2*К'
write(12,*) 'Плотность теплового потока, отнесенная к'
write(12,*) 'внутренней поверхности стенки медной'
write(12,*) 'трубы,qавн=',qaint,' Вт/м2'

```

```

write(12,*) 'Плотность теплового потока от наружной'
write(12,*) 'поверхности медной трубы к R22'
write(12,*) 'qор=qавн/betta=',qор,' 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=',кор,' 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=Qо/qвн=',Fint,' м2'
write(12,*) 'Площадь наружной поверхности оребренных'
write(12,*) 'труб, Fор'
write(12,*) 'Fор=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

```

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ	6
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	13
Приложение 1. Теплофизические свойства кипящего хладагента R22 на линии насыщения [2, 3]	14
Приложение 2. Теплофизические свойства водного раствора хлорида натрия [2, 3].....	14
Приложение 3. Сводка формул для определения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего хладагента	15
Приложение 4. Теплофизические свойства кипящего аммиака (R717) на линии насыщения [2, 3].....	17
Приложение 5. Теплофизические свойства водного раствора хлорида кальция [2, 3].....	17
Приложение 6. Программа расчета испарителя на языке Фортран 77.....	18

Цветков Олег Борисович
Лаптев Юрий Александрович
Пятаков Георгий Леонидович

РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Методические указания
для студентов специальностей
140401, 140504, 190603, 260601, 260602, 220301,
260202, 260204, 260301, 260303, 260504, 280201

Второе издание, исправленное

Редакторы
Р.А. Сафарова, Л.Г. Лебедева

Корректор
Н.И. Михайлова

Подписано в печать 14.11.2008. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,86. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,81
Тираж 300 экз. Заказ № 454 С 223

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