

Міністерство освіти і науки України
Одеська національна академія харчових технологій

Подмазко О.С.

ХОЛОДИЛЬНІ УСТАНОВКИ

Посібник до самостійної роботи
та виконання контрольного завдання
(5.05060403 курс 5, семестр 9)

Одеса - 2018

Розробив: доц. Подмазко О.С.

Рецензент: к.т.н., доцент Дідик Н.М.

Методичні вказівки розглянуті і затверджені на засіданні кафедри ХМУ і КП та рекомендовані до друку. Протокол № 2 від 2018 р.

Зав.кафедрою ХУ і КП проф. Хмельнюк М.Г.

Схвалено і затверджено методичною комісією за напрямом „Енергетика”
Протокол № від . . 2018 р.

Голова методичної комісії

доц. Жихарева Н.В.

I. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Дані методичні вказівки є посібником при виконанні домашнього завдання по курсу "Холодильні установки".

Метод розрахунку, приведений в методичних вказівках, базується на теоретичних матеріалах, викладених в спеціальних літературних джерелах.

У контрольній роботі, що представляється на перевірку, в обов'язковому порядку мають бути приведені:

1. Процес обробки повітря у повітроохолоджувачі в $d - h$ -діаграмі вологого повітря з вказівкою прийнятих і розрахункових параметрів (t , h , d) всіх характерних точок процесу в відповідності з рис. 2.
2. Результати розрахунку з описом усіх символів і їх розмірності, що входять в розрахункові залежності.
3. Ескіз теплообмінної секції повітроохолоджувача з нанесенням основних розмірів відповідно до рис. 5.

У додатку даних методичних вказівок приведені умови завдань (див. таблицю. П.1 додатка). Варіант завдання вибирається по двох останніх цифрах номера залікової книжки студента.

2. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧА

2.1 Вихідні дані до розрахунку.

Q_0 – теплове навантаження, Вт;

$t_{\text{кам}}$ – температура повітря в камері, °С;

$\phi_{\text{кам}}$ – відносна вологість повітря в камері, %;

$\delta_{\text{и}}$ – товщина інею на теплообмінній поверхні повітроохолоджувача;
робоча речовина: холодоагент (R-22 чи R-717).

Геометричні розміри і тип ребристої поверхні повітроохолоджувача(ПО), що задовольняють умовам варіанту завдання, вибираються студентом самостійно по таблиці П.2 додатка:

- труба (зовнішній діаметр - $d_{\text{н}}$, внутрішній діаметр - $d_{\text{вн}}$, товщина стінки - $\delta_{\text{тр}}$, матеріал - $\lambda_{\text{тр}}$);
- ребро (тип – ребро кругле РК, ребро пластинчатє РП; висота - h ; товщина біля вершини - $\delta_{\text{вр}}$; товщина біля основи - $\delta_{\text{ор}}$; крок - u ; матеріал - $\lambda_{\text{р}}$);
- компонування пучка труб (КП – коридорний, чи ШП – шаховий пучок);
- крок труб пучка: поперечний - S_1 (фронтальний – поперек потоку повітря); поздовжній - S_2 (вздовж потоку повітря); діагональний - S_2' .

При виборі геометричних розмірів и типу ребристої поверхні ПО, необхідно керуватися наступними рекомендаціями:

- крок ребер для всіх типів оребрення $u \geq (\delta_{\text{р}} + 2\delta_{\text{и}}) + 3\text{мм}$;
- крок труб пучків з круглими ребрами:
поперечний $S_1 = (D + 2\delta_{\text{и}}) + 3\text{мм}$; поздовжній $S_2 = (D + 2\delta_{\text{и}}) + 3\text{мм}$;
діагональний $S_2' = [S_2^2 + (S_1/2)^2]^{0.5} = (D + 2\delta_{\text{и}}) + 3\text{мм}$ - для шахових пучків.

Кроки труб пучків з пластинчатими ребрами визначені геометричними розмірами ребер.

2.2 Передумови до розрахунку.

У основу розрахунку закладені наступні передумови:

- параметри повітря на вході в повітроохолоджувач дорівнюють параметрам повітря в охолоджуваному приміщенні $t_{\text{кам}}$ і $\phi_{\text{кам}}$;
- температура кипіння холодильного агента t_0 , а також температура поверхні $t_{\text{п}}$ теплообмінної секції повітроохолоджувача - постійні;
- швидкість руху повітря в "живому" перерізі повітроохолоджувача, з урахуванням проектної (заданої) товщини інею, що осів, $\omega_{\text{в}} = 3 \dots 5$ м/с;
- кількість труб в подовжньому ($z_{\text{пр}}$) і поперечному ($z_{\text{п}}$) перерізі теплообмінної секції повітроохолоджувача, $z = 4 \dots 16$ шт.

Для проєктованих повітроохолоджувачів рекомендовані значення температурного напору - $\theta_{\text{м}}$ між середньою температурою повітря $t_{\text{ср.в}} = 0,5(t_{\text{вых.в.}} + t_{\text{кам}})$ і температурою робочого тіла (агенту) t_0 , і глибина підохолодження повітря в повітроохолоджувачі, $\Delta t_{\text{в}} = (t_{\text{кам}} - t_{\text{вых.в}})$ приймаються залежно від температури повітря в камері, (див. рис. 1).

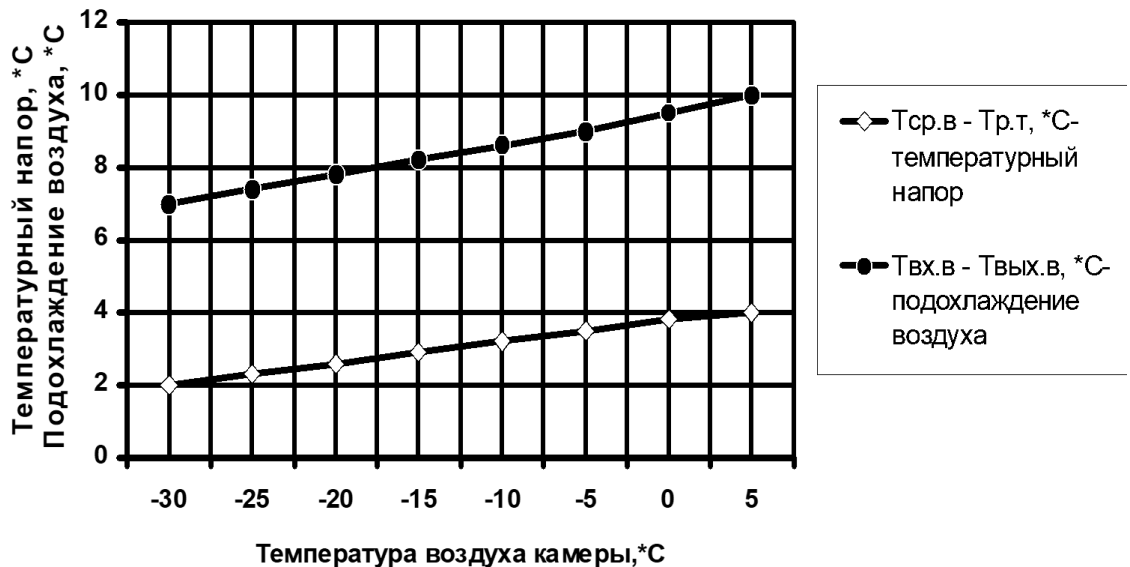


Рис. 1 Графік залежності зміни температурного напору $\theta_{\text{м}}$ і глибини підохолодження повітря $\Delta t_{\text{в}}$ у повітроохолоджувачі від температури повітря камери

2.3 Побудова процесу обробки повітря в повітроохолоджувачі.

1. Задаються величиною підохолодження повітря $\Delta t_{\text{в}}$ і середньою температурною поверхні повітроохолоджувача (інею) $t_{\text{п}}$ з умови, що $t_{\text{рт}} < t_{\text{п}} < t_{\text{ср.в}}$, використовуючи приблизне співвідношення $t_{\text{п}} = t_{\text{ср.в}} - (0,1 \dots 0,9)\theta_{\text{м}}$.
2. По $d - h$ -діаграмі чи за допомогою розрахункових залежностей приведених нижче, знаходять параметри повітря: $(t, d, h)_i$, а їх прийняті і уточнені чисельні значення заносять в таблицю 1 після завершення усіх розрахунків.

Будують процес зміни стану повітря у ПО (див. рис. 2) у наступній послідовності 1→П→2, де:

1 – стан повітря на вході в повітроохолоджувач при $t_{\text{кам}}$ і $\phi_{\text{кам}}$;

3 – стан насиченого повітря в пограничному шарі у поверхні інєю повітроохолоджувача при $t_{\text{и}}$ і $\phi = 1,0$;

2 – стан повітря на виході з повітроохолоджувача $t_2 = t_{\text{в.в.}} = t_{\text{кам}} - \Delta t_{\text{в.}}$.

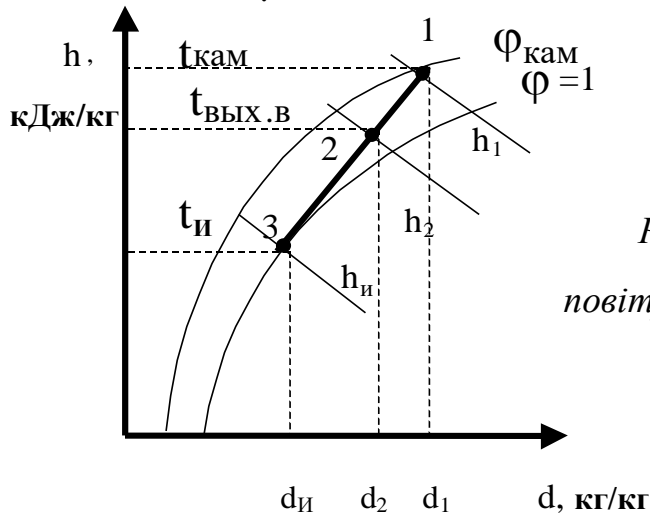


Рис.2 Процес зміни стану повітря у повітроохолоджувачі

Параметри вологого повітря

Таблиця 1

$\phi_{\text{к}}, \%$	$t_{\text{и}}, ^\circ\text{C}$			$d_{\text{и}} \cdot 10^3, \text{кг/кг}$				$h_{\text{и}}, \text{кДж/кг}$		
	$t_{\text{кам}}$	t_2	$T_{\text{и}}$	$d_{\text{кам}}$	$d_{\text{кам}}''$	d_2	$d_{\text{и}}''$	$h_{\text{кам}}$	h_2	h_3

2.4. Розрахунок геометричних характеристик ребристого теплопередавального елемента (див. рисунки додатка П.2).

2.4.1 Геометричні характеристики поверхні ребристого теплопередавального елемента, вільного від інєю.

Зовнішня поверхня ребра, м^2 :

$$f_{\text{р}} = 0,5 \cdot \pi \cdot (D^2 - d_{\text{н}}^2) + \pi \cdot D \cdot \delta_{\text{в.р}};$$

$$f_{\text{р}} = 2(A \cdot B - 0,785 \cdot d_{\text{н}}^2).$$

Зовнішня поверхня труби між двома суміжними ребрами, м^2 :

$$f_{\text{тр}} = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot (u - \delta_{\text{о.р}});$$

Внутрішня поверхня труби ребристого елемента, м^2 :

$$f_{\text{вн}} = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot u.$$

Повна зовнішня поверхня ребристого елемента, м²:

$$f_n = f_p + f_{тр.}$$

Коефіцієнт β і ступінь φ оребрення теплообмінної поверхні:

$$\beta = f_n / f_{вн}; \quad \varphi = f_n / (\pi \cdot d_n \cdot u)$$

Умовна міра оребрення теплообмінної поверхні:

$$\beta_n = f_n / f_{тр}$$

2.4.2 Геометричні характеристики поверхні інею, що осів, на ребристому теплопередавальному елементі.

Зовнішня поверхня інею на ребрі, м²:

$$f_{ри} = 0,5 \cdot \pi \cdot [(D + 2\delta_{и})^2 - (d_n + 2\delta_{и})^2] + \pi \cdot (D + 2\delta_{и}) \cdot (\delta_{в.р} + 2\delta_{и});$$

Зовнішня поверхня інею на трубі між двома суміжними ребрами, м²:

$$f_{три} = \pi \cdot (d_n + 2\delta_{и}) \cdot [u - (\delta_{о.р} + 2\delta_{и})];$$

Повна зовнішня поверхня інею на ребристому елементі, м²:

$$f_{ни} = f_{ри} + f_{три.}$$

Коефіцієнт $\beta^и$ оребрення поверхні, покритої інеєм, м²:

$$\beta^и = f_{ни} / f_{вн.}$$

2.4.3 Мінімальний "живий" переріз одного ребристого елемента, покритого шаром інею, заданої товщини, м²:

$$f_{ж} = u (s_1 - d_n - 2\delta_{и}) - 2h (\delta_{ср.р} + 2\delta_{и})$$

2.5. Температури і теплофізичні властивості середовищ.

Температура кипіння холодильного агента $t_{рт} = t_0 = t_{ср.в} - (7 \dots 10)$, °С.

Визначальна температура повітря $t_{ср.в} = 0,5 (t_{ввых в.} + t_{кам.})$, °С.

Теплофізичні властивості волого повітря $\nu_v, \lambda_v, Pr_v, \rho_v$ встановлюють по визначальній температурі з таблиць /1/.

Кінцевою метою теплового розрахунку є визначення площі поверхні повітроохолоджувача, яка повинна відводити задане теплове навантаження і підтримувати необхідну температуру повітря в камері.

Залежно від умов завдання і з урахуванням рекомендацій по проектуванню, необхідно задатися температурним напором $(t_{ср.в} - t_0)$ і тоді площа сухої поверхні повітроохолоджувача визначається з вираження:

$$F_H = Q_0 / [k_H \cdot (t_{cp,v} - t_0)], \text{ м}^2 \quad (1)$$

Тут теплове навантаження Q_0 задано технічним завданням, а температуру робочого тіла ($t_{рт} = t_0$) і середню температуру повітря в повітроохолоджувачі $t_{cp,v}$ студент вибирає самостійно відповідно до рекомендацій, приведених вище.

Таким чином, єдиною невідомою величиною в цій залежності є коефіцієнт теплопередачі повітроохолоджувача k_H , для визначення якого необхідно врахувати усі термічні опори, що входять в його розрахункову залежність.

2.6. Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²К):

- віднесений до зовнішньої поверхні інею:

$$k_H^i = (1/\alpha_{пр,н} + \varphi \cdot \delta_T / \lambda_T + \beta^i / \alpha_0)^{-1}; \quad (2)$$

- віднесений до зовнішньої "сухої" поверхні оребреної труби без інею:

$$k_H = k_H^i \beta / \beta^i. \quad (2')$$

2.6.1. Теплообмін з боку вологого повітря.

Умовний коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до зовнішньої поверхні ребристого елемента, Вт/(м²К):

$$\alpha_{пр,н} = \alpha_{пр} (f_p \cdot E \cdot \Psi \cdot c_k + f_{тр}) / f_H \quad (3)$$

де $\alpha_{пр}$ – приведений коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні теплопередавального елемента з урахуванням термічного опору шару інею, Вт/(м²К):

$$\alpha_{пр} = [1/(\alpha_k \cdot \xi) + \delta_{и} / \lambda_{и}]^{-1} \quad (4)$$

E – коефіцієнт ефективності ребра:

$$E = th \, mh' / mh' \quad (5)$$

де mh' – безрозмірний комплекс; $m = [2\alpha_{пр} / (\delta_p / \lambda_p)]^{0,5}$; h' – умовна висота ребра:

$$h' = h(1 + 0,35 \ln \rho)$$

$$\rho = D_p / d_H,$$

$$h = 0,5(D_p - d_H)$$

Вихідні рівняння для розрахунку умовної висоти ребра для різних типів теплообмінних поверхонь приведені в таблиці 2.

Коефіцієнт теплопровідності деяких матеріалів ($\lambda_t, \lambda_p, \lambda_{и}$):

- сталь 45 - 50 Вт/(м·К);
- мідь 380 Вт/(м·К);
- алюмінієві сплави 120-180 Вт/(м·К);
- іній, $\lambda = f(\rho_{и})$ 0,15-0,25 Вт/(м·К).

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі від повітря до поверхні інею, Вт/(м²К):

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda_B / l \quad (6)$$

де l - визначальний розмір, м; λ_B - коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К).

Коефіцієнт вологовипадіння:

$$\xi = 1 + (d_{кам}'' \cdot \varphi_{кам} - d_{и}'') \cdot (r - h_{и}) / [c_B'(t_{кам} - t_{и})] \quad (7)$$

де r - питома теплота фазового переходу, (кДж/кг):

$r = 2501$ (при $t_k \geq 0^\circ\text{C}$), $r = 2835$ (при $t_k < 0^\circ\text{C}$);

$d_{и}''$ - вологовміст повітря в пограничному шарі у поверхні інею при $t_{и}$ і $\varphi = 1,0$;

$h_{и} = c_{и} \cdot t_{и} = 2,09 \cdot t_{и}$ - ентальпія інею, кДж/кг;

$c_B' = 1,006 + 1,87 \cdot d_m$ - питома теплоємність вологого повітря, кДж/(кг·К);

$d_m = 0,5(d_{кам} + d_{вых.в})$ - вологовміст повітря при середній температур, кг/кг.

Критерій Nu:

$$Nu = 0,303 \cdot Re^{0,625} \cdot Pr^{0,36} \beta_H^{-0,375}$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = (\omega_B \cdot l) / \nu_B,$$

де ν_B - кінематична в'язкість повітря при визначальній температурі, с²/м.

2.6.2. Теплообмін з боку робочого тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі при кипінні робочого тіла в трубах апарату, Вт/(м²К):

аміаку (R-717):

$$\alpha_0 = (103,2 + 0,19t_0) q_B^{0,25} \quad (8)$$

хладону R22:

$$\alpha_0 = 32 q_B^{0,15} \cdot (\omega_p)^{0,47} \quad (9)$$

де ω_r - масова швидкість холодоагенту (див. рис. 3) у трубі повітроохолоджувача, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$; q_v - щільність теплового потоку, віднесена до внутрішньої поверхні труби, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

$$q_v = \alpha_k \cdot \xi \cdot (t_{\text{ср.в}} - t_{\text{и}}) \cdot \beta^{\text{и}} \quad (10)$$

де $t_{\text{и}}$ - температура поверхні інею.

2.7. Перевірка раніше прийнятої температури поверхні інею і визначення площі зовнішньої поверхні повітроохолоджувача.

Щільність теплового потоку, віднесена до зовнішньої поверхні інею:

$$q_{\text{н}} = \kappa_{\text{н}}^{\text{и}} (t_{\text{ср.в}} - t_{\text{рт}}) \quad (11)$$

Прийнята різниця температур повітря і поверхні інею (див. рис. 3)

$$\Delta t = t_{\text{ср.в}} - t_{\text{и}} = (0,1 \dots 0,9) \cdot \theta_{\text{м}}$$

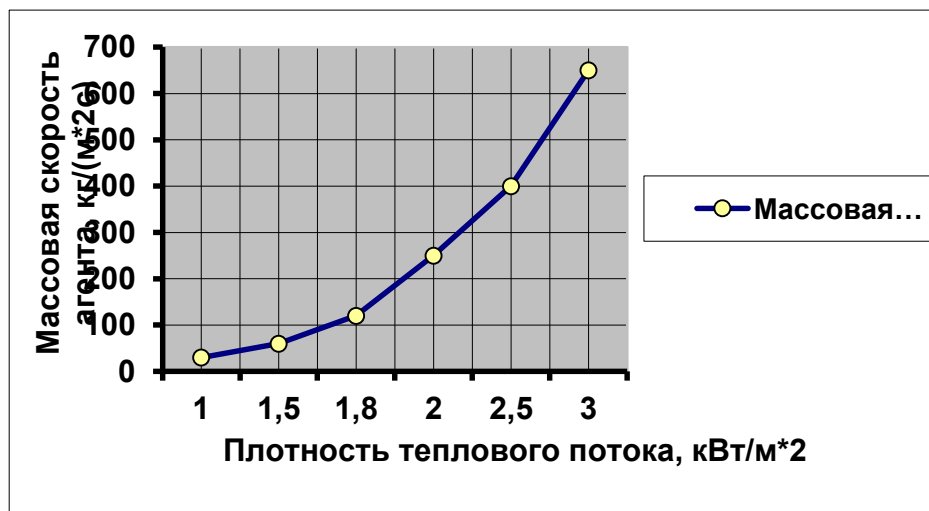


Рис. 3 Графік залежності масової швидкості холодоагенту (ω_r) $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ від щільності теплового потоку, віднесеної до внутрішньої поверхні труби (q_v) $\text{кВт}/\text{м}^2$.

Розрахункова різниця температур повітря і поверхні інею:

$$\Delta t_p = q_{\text{н}} / \alpha_k \cdot \xi \quad (12)$$

Відносна похибка прийнятої і розрахункової різниці температур:

$$\delta = |(\Delta t_p - \Delta t) / \Delta t_p| \cdot 100, \% \quad (13)$$

Якщо похибка $\delta > \pm 5 \dots 6\%$, то розрахунок повторюють з новим значенням температури поверхні інею - $t_{\text{и}} = t_{\text{ср.в}} - 0,5(\Delta t + \Delta t_p)$.

Якщо значення похибки $\delta \leq \pm 5...6\%$, то з урахуванням рівняння (2') визначають площу (сухої) зовнішньої поверхні повітроохолоджувача по залежності (1).

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧА

№ варіант у	Q ₀ , Вт	t _{кам} , °C	φ _{кам} , %	Агент	δ інею, мм
00	9000	-20	95	R-717	5
01	10000	-18	92	R -22	4
02	8000	-15	91	R-717	3
03	7000	-23	93	R-717	4
04	6000	-10	85	R -22	3
05	6500	-5	86	R-717	5
06	7500	0	85	R -22	3
07	8500	-14	89	R -22	2
08	9500	-16	92	R -22	3
09	11000	+2	87	R-717	4
10	11500	0	90	R-717	5
11	12000	-2	90	R -22	5
12	9000	-10	92	R-717	5
13	10000	-15	93	R -22	5
14	10500	-18	94	R -22	6
15	9300	-20	95	R-717	4
16	6000	-23	95	R-717	4
17	6700	-25	95	R-717	4
18	6800	-5	86	R -22	5
19	7100	-10	87	R-717	3
20	8200	-15	90	R-717	3,5
21	8400	-20	93	R-717	4,5
22	8700	-25	95	R-717	5
23	9300	-23	93	R -22	4,5
24	10000	-18	92	R -22	3

№ варіант у	Q ₀ , Вт	t _{кам} , °C	φ _{кам} , %	Агент	δ інею, мм.
25	9000	-10	90	R -22	2,5
26	10000	0	86	R -22	3
27	10500	-5	85	R -22	3,5
28	10200	-20	93	R-717	4
29	9300	-10	90	R-717	4,5
30	6600	-15	91	R -22	5
31	6800	-23	96	R -22	5,5
32	6900	0	87	R -22	5
33	7200	-23	94	R-717	4
34	7600	-15	90	R -22	3
35	7800	-10	87	R-717	2
36	8100	-20	93	R-717	4
37	9000	-23	95	R-717	5
38	10000	-20	95	R-717	6
39	10500	-10	90	R -22	5
40	9300	-15	90	R -22	5
41	6600	0	85	R-717	4
42	9100	-23	94	R-717	3
43	9300	-20	94	R-717	2
44	9400	-10	92	R-717	2
45	9700	-15	93	R -22	2
46	9800	-15	95	R -22	1
47	9900	0	87	R-717	3
48	6400	-5	85	R-717	4
49	10000	-20	90	R-717	4,5

№ варіант у	Q ₀ , Вт	t _{кам} , °C	φ _{кам} , %	Агент	δ інею, мм
50	9300	-14	87	R-717	5
51	7100	-16	85	R-717	4,5
52	10500	-18	90	R -22	4
53	8400	-20	94	R-22	3
54	11100	-23	95	R -22	3,5
55	10200	-25	96	R-717	2
56	10500	-12	92	R-22	2,5
57	8700	+1	85	R -22	4
58	8350	0	85	R -22	4
59	9300	+2	87	R-717	6
60	6450	-5	84	R-717	5
61	10500	-3	85	R -22	3,5
62	9300	-10	89	R -22	4,5
63	7100	-12	88	R -22	4
64	6000	-17	90	R-717	3
65	5800	-23	93	R -22	3,5
66	8700	-20	95	R-717	2
67	9100	-16	90	R -22	6
68	10500	-15	92	R -22	3
69	7000	+2	85	R-717	4
70	9300	0	87	R-717	3
71	6700	-2	87	R-717	4
72	6600	-5	85	R -22	5
73	6000	-10	89	R -22	3
74	7100	-14	90	R-717	3,5

№ варіант у	Q ₀ , Вт	t _{кам} , °C	φ _{кам} , %	Агент	δ інею, мм
75	6000	-20	95	R-717	5
76	6600	-10	90	R -22	4
77	10500	-5	87	R -22	3
78	7100	0	85	R-717	2
79	9300	+5	83	R -22	1
80	6700	-2	85	R -22	4
81	10500	+2	84	R-717	3
82	6000	-15	87	R-717	5
83	7000	-20	94	R -22	6
84	9500	-23	94	R -22	3,5
85	9200	-25	95	R -22	6
86	8250	-12	90	R-717	4,5
87	9300	-15	90	R-717	3
88	6700	-20	94	R-717	3,5
89	6600	-10	90	R -22	2
90	7350	-5	90	R-717	3
91	8400	0	85	R -22	4
92	7100	+2	87	R-717	2
93	6000	+1	85	R -22	3
94	6720	-5	86	R -22	3,5
95	7560	-15	90	R -22	4
96	10500	-23	95	R-717	3,4
97	9300	-18	95	R-717	5,5
98	6700	-20	94	R -22	3
99	6600	-12	92	R -22	3,5

Приклад розрахунку повітроохолоджувача

Вихідні дані:

$$Q_o = 12\,000 \text{ кВт} \quad t_k = 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad \varphi_k = 90\% \quad R\,717$$
$$d_H = 0,025 \text{ м} \quad d_{BH} = 0,02 \quad \delta_T = 0,0025 \text{ м} \quad \lambda_{CT} = 45 \text{ Вт/(мК)} \quad h = 0,023 \text{ м}$$
$$\delta_{BP} = 0,0008 \text{ м} \quad \delta_{OP} = 0,012 \text{ м} \quad \lambda_p = 180 \text{ Вт/(мК)}$$

Приймаємо:

$$u = 0,012 \text{ м} \quad S_1 = 0,085 \text{ м} \quad S_2 = 0,085 \text{ м} \quad S'_2 = 0,074 \text{ м} \quad \delta_{AL} = 1,5 \text{ мм} \quad d_H = 0,028 \text{ м}$$

Розраховуємо геометричні характеристики:

$$F_p = 8,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \quad F_T = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad F_{BH} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$F_H = F_p + F_T = 8,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\beta = 12 \quad \varphi = 8,5 \quad \beta_{усл} = 9,45$$

$$F_{p..и.} = 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$F_{T..и.} = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$F_{H..и.} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\beta_{ин} = 14,7 \quad f_{ж} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Задаємося:

$$\omega = 4 \text{ м/с} \quad \Delta t_B = 3 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_{cp} = 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_1 = +1,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_2 = -1,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_0 = t_{cp} - (7 \dots 10) = 0 - 8 = -8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Отримаємо:

$$\Theta = t_{cp} - t_0 = 0 - (-8) = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Визначаємо теплофізичні властивості повітря при середній температурі t_{cp} :

$$\nu = 13,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad Pr = 0,707 \quad \rho = 1,273 \text{ кг/м}^3 \quad \lambda = 2,44 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(мК)}$$

$$c_p = 1,0131 \text{ кДж/(кг К)}$$

Приймаємо у якості визначального розміру діаметр труби і визначаємо число Re:

$$Re = 4 \cdot 0,028 / 13,78 \cdot 10^{-6} = 8127,7 \text{ (діаметр труб)}$$

Визначаємо умови теплообміну для вибору залежності Nu:

$$\varphi = \frac{(F_p + F_{TP})}{F_{TP}} = 8,5 \quad n = 0,61 \cdot 8,5^{0,08} = 0,723 \quad C_s = 1 \quad C_Z = 0,95$$

$$Nu = (1 - 0,723) \cdot 0,95 \cdot 8,5^{-0,5} \cdot 8127,7^{0,723} = 60,58$$

Вибираємо залежність і визначаємо α_k :

$$\alpha_k = 60,58 \cdot 2,44 \cdot 10^{-2} / 0,028 = 52,79$$

Коефіцієнт вологовипадіння:

$$\xi = 1 + (3,441 - 2,729) \cdot 10^{-3} (2501 - 2,09 \cdot (-4)) / [1,0131(0+4)] = 1,44$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі з урахуванням інею:

$$\alpha_{np} = \left[\frac{1}{\alpha_k \cdot \xi} + \frac{\delta_u}{\lambda_u} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{52,79 \cdot 1,44} + \frac{0,003}{0,2} \right]^{-1} = 35,5 \text{ Вт/ (м}^2\text{К)}$$

Коефіцієнт ефективності ребра:

$$E = \frac{th \cdot mh}{mh} = \frac{th \left(\frac{h'}{\delta_h} \sqrt{\frac{2\alpha\delta}{\lambda}} \right)}{\frac{h'}{\delta_h} \sqrt{\frac{2\alpha\delta}{\lambda}}} = 0,238 / 0,243 = 0,98$$

$$h' = h \left(1 + 0,35 \ln \frac{D}{d_n} \right) = 0,023 [1 + 0,35 \cdot \ln(0,076/0,028)] = 0,031$$

$$\psi = 1 - 0,058 \cdot mh = 1 - 0,058 \cdot 0,243 = 0,985$$

Умовний коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до зовнішньої поверхні:

$$\alpha_{пр.н} = 35,5 (8,03 \cdot 10^{-3} \cdot 0,98 \cdot 0,985 \cdot 1,0 + 9,5 \cdot 10^{-4}) / 8,98 \cdot 10^{-3} = 34,4 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі при кипіння аміаку:

$$q_{вн} = \alpha_{пр} \cdot (t_{с.в} - t_{ин}) \beta_{ин} = 35,5 (0 + 4) 14,7 = 2087,4 \text{ Вт/м}^2$$

$$\alpha_0 = (103,2 + 0,19 t_0) q_v^{0,25} = [103,2 + 0,19 (-8)] 2087,4^{0,25} = 687,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Коефіцієнт теплопередачі, віднесений до поверхні інею:

$$K_H^{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{пр.н}} + \frac{\varphi\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\beta^I}{\alpha_0}} = \frac{1}{\frac{1}{34,4} + \frac{8,5 \cdot 0,0025}{45} + \frac{14,7}{687,3}} = 19,63 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Коефіцієнт теплопередачі, віднесений до сухої поверхні без інею:

$$K_H = K_H^{II} \frac{\beta}{\beta^{II}} = 19,63 \cdot \frac{12}{14,7} = 16,02 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

Перевіряємо значення раніше прийнятої температури поверхні:

$$\Delta t_h = \frac{q_H}{\alpha_{np}} = \frac{K_{Hn}''(t_c - t_0)}{34,4} = \frac{16,02(0+8)}{34,4} = 4,56$$

$$[(4,56-4)/4] \cdot 100 = 14\%5$$