

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Расчет расхода холода

Прежде чем приступить к выбору конструктивных параметров оборудования проектируемой холодильной установки, требуется произвести определенные расчеты.

При положительном результате анализа запроса клиента перед составлением соответствующего предложения надо выполнить следующее:

- 1) уточнить во всех деталях поставленную задачу;
- 2) конкретизировать требования к исполнению проектируемой установки;
- 3) разработать предварительную концепцию оптимального решения.

Изучив весь объем данных, необходимых в рамках предстоящего проекта, переходим к расчету расхода холода, используя для этой цели все возможные способы – аналитический, табличную форму, имеющиеся диаграммы и номограммы.

При расчете расхода холода вычисляются вначале отдельные частные нагрузки как составляющие полной нагрузки, дающие в сумме общую потребность в холоде.

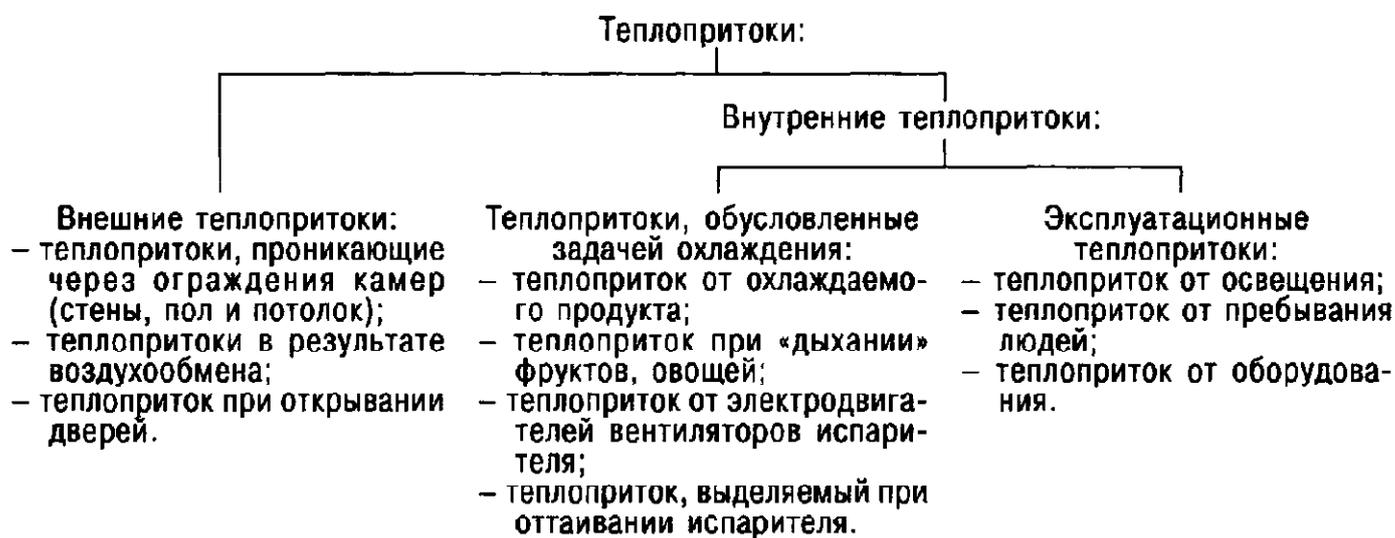


Рис. 2.1. Теплопритоки от различных источников

2.1.1. Расчет составляющих внешней нагрузки

2.1.1.1. Расчет теплопритоков через ограждения камеры

Ограждающие конструкции холодильной камеры рассчитываются каждая отдельно и последовательно друг за другом.

Особое внимание при этом следует уделять положению стен, их конструктивному исполнению и соответствующей разности температур, а также относящимся сюда коэффициентам теплопередачи (k).

Далее рассчитываются теплопритоки от пола и потолка.

В заключение суммируются полученные результаты.

Для расчета теплопритоков предлагается следующее уравнение:

$$Q_E = F \cdot k \cdot \Delta T, \text{ (м}^2 \cdot \text{Вт} \cdot \text{К)} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) = \text{Вт},$$

где F – площадь поверхности ограждения, м^2 ;

ΔT – разность температур снаружи ограждения и внутри камеры, К ;

k – коэффициент теплопередачи ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Пример:

Требуется вычислить поток проникающей в холодильную камеру теплоты, если температура камеры $t_R = 0^\circ\text{C}$.

Допустим, данная холодильная камера сконструирована из не имеющих тепловых мостов ячеистых элементов типа «сэндвич», самонесущих, из жесткого пенополиуретана толщиной 100 мм.



Рис. 2.2. Камера для охлаждения мяса

Соединение элементов осуществляется по системе «в шпунт и гребень» с использованием защищенной от коррозии эксцентриковой винтовой стяжки.

Технические характеристики:

Толщина стен (мм)	100
Теплоизоляция	жесткий пенополиуретан
Плотность пены ($\text{кг}/\text{м}^3$)	40
Теплопроводность ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$)	$< 0,02$
Коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$)	0,19
Рекомендуемая разность температур ΔT (К)	до 45

При известном из технической документации изготовителя значения коэффициента теплопередачи для элементов стен и потолка ($k = 0,19 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$) отпадает необходимость в вычислении этого параметра по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_b}}, \text{ (Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К)},$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи с наружной стороны ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

α_b – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

δ_n – толщина отдельных слоев конструкции, м;

λ_n – коэффициент теплопроводности материалов конструкции ограждения, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$.

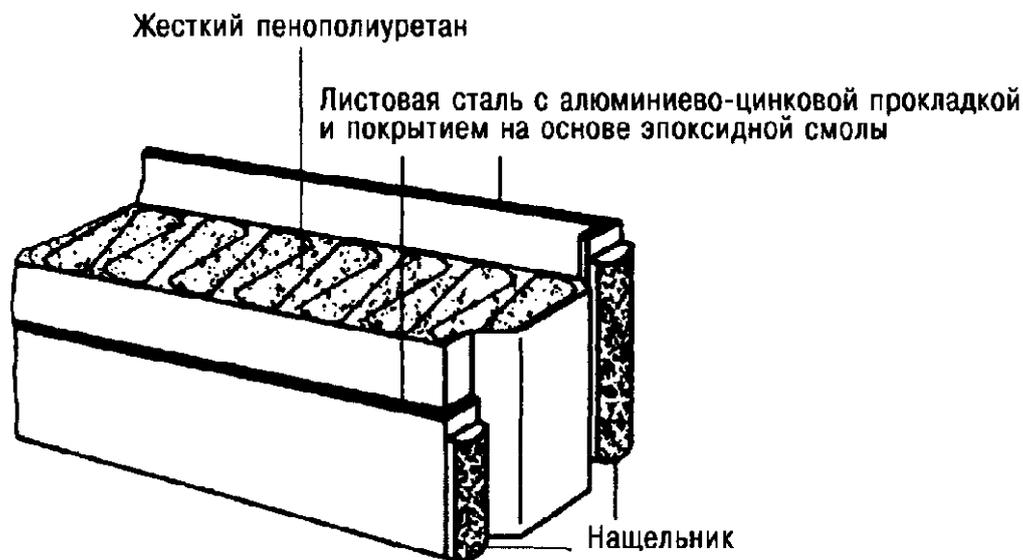


Рис. 2.3. Структура элементов стен и потолка

Стена 1:

Холодильная секция изнутри прилегает к имеющейся сплошной стене здания, поэтому учитывается только коэффициент теплопроводности ячеистого элемента.

При расчете холодильной нагрузки автор использовал для определения общей площади известные внутренние размеры.

$$Q_E, \text{ стена 1} = (7,8 \times 3,4) \times 0,19 \times 32 = 161,24 \text{ Вт};$$

$$Q_E, \text{ стена 2} = (3,6 \times 3,4) \times 0,19 \times 16 = 37,21 \text{ Вт};$$

$$Q_E, \text{ стена 3} = (7,8 \times 3,4) \times 0,19 \times 16 = 80,62 \text{ Вт};$$

$$Q_E, \text{ стена 4} = (3,6 \times 3,4) \times 0,19 \times 16 = 37,21 \text{ Вт};$$

$$Q_E, \text{ потолок} = (7,8 \times 3,6) \times 0,19 \times 16 = 85,36 \text{ Вт}.$$

Таблица 2.1. Конструкция пола (в направлении снаружи → внутрь)

	$\delta, \text{ м}$	$\lambda, \text{ Вт/м К}$	$\delta/\lambda, \text{ м}^2/\text{Вт}$
Бетонная подготовка	0,15	1,279	0,1173
Слой битума	0,015	0,16	0,0938
Звукоизоляция (стиродур)	0,10	0,030	3,333
Верхний слой бетона	0,10	1,279	0,0782
Бесшовное покрытие	0,05	1,924	0,026
Облицовочная плитка	0,015	1,05	0,0143
			$\Sigma = 3,6626$

$\alpha_{\text{в}} = 19 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ для внутренних стен холодильной камеры; значение $\alpha_{\text{н}}$ не учитывается (пол непосредственно прилегает к грунту).

Термическое сопротивление (равное обратной величине коэффициента теплопередачи) для пола составляет:

$$\frac{1}{k} = 3,7152 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Коэффициент теплопередачи для пола $k = 0,2692 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

$$Q_{E \text{ пола}} = (7,8 \times 3,6) \times 0,2692 \times 15 = 113,39 \text{ Вт.}$$

$$t_{\text{грунта}} = +15^{\circ}\text{C.}$$

$$Q_{E \text{ общ}} = Q_{E \text{ стены 1}} + Q_{E \text{ стены 2}} + Q_{E \text{ стены 3}} + Q_{E \text{ стены 4}} + Q_{E \text{ потолка}} + Q_{E \text{ пола}}, \text{ Вт.}$$

$$Q_{E \text{ общ}} = 161,24 + 37,21 + 80,62 + 37,21 + 85,36 + 113,39 = 515,03 \text{ Вт.}$$

Таким образом, полный теплоприток в холодильную камеру составит:

$$Q_{E \text{ общ}} = 515,03 \text{ Вт.}$$

2.1.1.2. Расчет теплопритока в результате воздухообмена

Рассматриваемый в качестве частичной нагрузки воздухообмен в холодильной камере необходимо учитывать в тех случаях, когда температура поступающего в камеру воздуха превышает температуру самой камеры, то есть осуществляется вентиляция помещения.

Рассчитывается коэффициент воздухообмена из расчета на 1 сутки:

$$n = \frac{70}{\sqrt{V_R}}, \text{ за 1 сутки,}$$

где V_R – объем вентилируемого помещения, м^3 .

Для данного примера имеем:

$$V_R = 7,8 \times 3,6 \times 3,4 = 95,47 \text{ м}^3.$$

$$\sqrt{V_R} = 9,771.$$

$$n = \frac{70}{9,771} = 7,16 \text{ за 1 сутки.}$$

Теплоприток от вентиляции (Q_n) рассчитывается с использованием следующих уравнений:

$$Q_L = m_L \cdot \Delta h \text{ в кДж/с} = \text{кВт,}$$

или:

$$Q_L = \frac{V_R \cdot n \cdot \rho_{L_i} \cdot \Delta h}{24 \cdot 3600 \text{ с/день}} \text{ кВт,}$$

где m_L – расход вентилируемого воздуха, кг/с ;

Δh – разность энтальпий наружного и воздуха внутри камеры, кДж/кг ;

ρ_{L_i} – плотность воздуха в холодильной камере, кг/м^3 .

При температуре 0°C и нормальном атмосферном давлении $\rho_{L_i} = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Для определения Δh используется диаграмма влажного воздуха, h, x (рис. 2.4):

$$\Delta h = h_{L,a} - h_{L,i}, \text{ кДж/кг;}$$

$$\Delta h = 36 - 7,5 = 28,5 \text{ кДж/кг.}$$

Для приведенного примера величина теплопритока от вентиляции камеры равна:

$$Q_L = \frac{95,47 \cdot 7,16 \cdot 1,2930 \cdot 28,5}{86400} = 0,2915 \text{ кВт} = 291,50 \text{ Вт.}$$

2.1.1.3. Расчет теплопритока при открывании дверей

Для холодильных камер небольшой площади достаточно вычисления части холодильной нагрузки, связанной с воздухообменом; для больших холодильников с множеством дверей рекомендуется выполнить дополнительный расчет возможных при этом теплопритоков.

Такой расчет производится по расширенной формуле Тамма:

$$Q_{\text{двери}} = [8,0 + (0,067 \cdot \Delta T_{\text{двери}})] \cdot \tau_{\text{двери}} \cdot \rho_{L,i} \cdot V_{\text{двери}} \cdot H_{\text{двери}} \times \\ \times \sqrt{H_{\text{двери}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{L,a}}{\rho_{L,i}}\right)} \cdot (h_{L,a} - h_{L,i}) \cdot \eta_{LS}, \text{ Вт},$$

где $\Delta T_{\text{двери}} = T_a - T_i$;

$\tau_{\text{двери}}$ – время открытия двери из расчета на тонну грузооборота, мин/т;

$V_{\text{двери}}$ – ширина двери, м;

$H_{\text{двери}}$ – высота двери, м;

$\rho_{L,a}$ – плотность воздуха в камере, кг/м³;

$h_{L,a}$ – энтальпия воздуха снаружи камеры, кДж/кг;

$h_{L,i}$ – энтальпия воздуха внутри камеры, кДж/кг;

η_{LS} – КПД воздушной завесы; для помещений без воздушной завесы $\eta_{LS} = 1$;

для помещений с воздушной завесой $\eta_{LS} = 0,25$.

В рассматриваемом примере показана холодильная камера с двумя дверями, которые при этом остаются открытыми одинаково долго. Приведенный расчет относится лишь к одной из них.

Таблица 2.2. Грузовая емкость холодильной камеры (масса m_B продуктов в кг на м³ камеры)

Охлаждаемый продукт	m_B , кг/м ³	Вид упаковки	Охлаждаемый продукт	m_B , кг/м ³	Вид упаковки
Яблоки	350	ящики	Торты и пирожные		складные
Апельсины	400	ящики	с кремом	70	короба
Бананы	250	связки	Морковь, нарезанная	420	экспресс-
	300	картонные	кубиками		упаковка
Пиво	600	бочки	Миндаль, очищенный	500	мешки
	650	ящики	То же, неочищенный	350	мешки
			Мука	700	мешки
Фасоль	600	мешки	Молоко	800	ящики
	700	без тары	Устрицы	400	корзины
Хлеб	250	без тары	Масло растительное	650	бочки
Масло сливочное	650	кадки	Перец	400	мешки
	1000	картонные	Сливы сушеные	600	ящики
		короба		800	без тары
Кишки	500	бочки	Рис	700	мешки
Яйца	350	ящики	Изюм	600	ящики
Яичный желток	600	кадки	Свекла	600	без тары
Яичный желток,		консервные	Ром	550	бочки
замерзший	1000	банки	Топленый свиной жир	550	чаны
Горох	700	мешки	Соевые бобы	800	мешки

Таблица 2.2. (окончание)

Охлаждаемый продукт	m_v , кг/м ³	Вид упаковки	Охлаждаемый продукт	m_v , кг/м ³	Вид упаковки	
Земляной орех, очищенный	400	мешки	Шпиг соленый	650	бочки	
			Сладкие фрукты	350	ящики	
Земляной орех, неочищенный	250	мешки	Табак	350	бочки	
		ящики		250	тюки	
Жир	900	бочки	Жир животный	500	кадки	
Рыба, в тузлуке	350	бочки	Вино	400	бочки	
– сельдь	800	бочки		650	ящики	
– рыба, разделанная на клипфиск	600	ящики	Сахар	750	мешки	
– сардины	900	бочки				
Мясо, замороженное			Свежемороженые продукты в мелкой упаковке			
– говядина	400	без тары		Яблочное пюре	670	экспресс- упаковка
– четвертины говяжьих туш	300	без тары		Ягоды	450	
– баранина	300	без тары				
– свинина	350	без тары				
Мясо, охлажденное			Сдоба, выпекаемая на листах	250	картонки в пленке	
– на подвесном пути	350	жестяные		Цветная капуста	330	экспресс- упаковка
– соленое	650	банки		Зеленая фасоль	370	
– сушеное	650	тюки	Сладкие блюда и десерты	155	картонки в пленке	
Зерно	650	без тары	Зеленый горошек	440	экспресс-уп.	
Мед	900	бочки	Готовые блюда	175	формы с 3 отделениями	
Кофе, очищенный	500	мешки		325	формочки, поддоны	
Кофе, неочищенный	450	мешки				
Какао	450	мешки				
Картофель	700	без тары	Огурцы, нарезанные кружками	500	экспресс- упаковка	
	400	мешки				
Сыр	500	ящики	Дрожжи прессованные	260	мешки	
Чечевица	600	мешки	Вишня, черешня	450	экспресс-уп.	
Кукуруза	700	мешки	Мелкоштучные хлебобулочные изделия	100	мешки	
Макаронные изделия	200	ящики				
Солод	400	бочки	Капуста брюссельская	610	экспресс-уп.	
	650	мешки	Морковь с зеленым горошком	420	экспресс упаковка	
Мандарины	450	ящики	Сливы половинками	510	экспресс-уп.	
Капуста	440	экспресс- упаковка	Шпинат	610	экспресс-уп.	
			Томаты, нарезанные кружками	500	экспресс- упаковка	

Таблица 2.3. Коэффициенты грузораспределения η_B с учетом имеющихся контрольных проходов, проездов, стенов и стеллажей

Способ хранения	η_B
Охлажденные продукты (долгосрочное хранение, на поддонах)	0,65...0,7
Охлажденные продукты (хранение в зависимости от ассортимента, на поддонах)	0,45...0,5
Свежемороженые продукты в мелкой расфасовке (долгосрочное хранение, на поддонах)	0,75...0,8
Свежемороженые продукты в мелкой расфасовке (хранение в зависимости от ассортимента, на поддонах)	0,6 ...0,6

На основе приведенных данных m_B для укладываемых на хранение охлажденных продуктов, а также коэффициентов η_B легко вычислить фактический вес всех продуктов, помещенных в холодильную камеру:

$$m = F_B \cdot H_{St} \cdot m_B \cdot \eta_B, \text{ кг,}$$

где m – фактический вес охлаждаемых продуктов, кг;

F_B – площадь холодильной камеры, м²;

H_{St} – максимальная высота штабеля охлаждаемого продукта, м;

m_B – грузовая емкость, кг/м³;

η_B – коэффициент грузораспределения.

Таблица 2.4. Грузооборот в холодильной камере

Тип раздвижной двери	Вид продукта	τ двери, мин/тонну грузооборота
с ручным обслуживанием	замороженные туши	15
	продукты на поддонах	6
с механическим управлением	замороженные туши	1
	продукты на поддонах	0,8

Из табл. 2.4 видно, что на тонну грузооборота при механической двери ручного обслуживания и хранении продуктов на поддонах потребуется 0,8 минуты.

- $\Delta T_{\text{двери}} = 16 \text{ К.}$
- $\tau_{\text{двери}} = 0,8 \text{ мин/тонну грузооборота.}$
- $B_{\text{двери}} = 1,2 \text{ м.}$
- $H_{\text{двери}} = 2,0 \text{ м.}$
- $\rho_{L,a} = 1,2215 \text{ кг/м}^3.$
- $\rho_{L,i} = 1,2930 \text{ кг/м}^3.$
- $h_{L,a} = 36 \text{ кДж/кг.}$
- $h_{L,i} = 7,5 \text{ кДж/кг.}$
- $\eta_{LS} = 1,0.$

Продолжительность открытия двери холодильной камеры (в минутах) дается в пересчете на тонну грузооборота.

Перед проектировщиками встает вопрос, сколько всего тонн охлаждаемого продукта можно разместить в холодильной камере? В табл. 2.2 представлен один из вариантов решения. С помощью этой таблицы следует определить соответствующую плотность загрузки конкретного продукта с учетом грузовой емкости камеры.

- Для охлажденных мясных туш, хранящихся на подвесном пути, устанавливается значение $m_B = 350 \text{ кг/м}^3.$

- Площадь холодильной камеры составляет $F_B = 28,08 \text{ м}^2$.
- «Высота штабеля» принимается равной $H_{St} = 2,0 \text{ м}$.
- Коэффициент грузораспределения $\eta_B = 0,5$.

Вычисляем общую массу продукта, вмещаемую камерой:

$$m = F_B \cdot H_{St} \cdot m_R \cdot \eta_B, \text{ кг.}$$

$$m = 28,08 \cdot 2,0 \cdot 350 \cdot 0,5 = 9\,828 \text{ кг.}$$

Таким образом, данная холодильная камера способна принять почти 10 тонн мяса. Для дальнейших расчетов придется еще учитывать суточный грузооборот, что позволит избежать выбора избыточных параметров конструктивных элементов.

Ежедневная норма оборота продукта устанавливается с остаточными 25% от $m_{\text{общ}}$, то есть составляет: $m = 2\,457 \text{ кг/сутки}$.

С учетом вышеприведенных данных величина теплопритока составит:

$$Q_{\text{двери}} = [8,0 + (0,067 \cdot 16)] \cdot 0,082 \cdot 1,2930 \cdot 1,2 \cdot 2,0 \cdot \sqrt{2,0 \cdot \left(1 - \frac{1,2215}{1,2930}\right)} \cdot (36 \cdot 7,5) = 21,88 \text{ Вт.}$$

Вспомогательный расчет:

$$\tau_{\text{двери}} = \frac{0,8 \text{ мин} \cdot 2,457 \text{ т} \cdot \text{сутки}}{t \cdot 24 \text{ часа} \cdot \text{сутки}} = 0,082.$$

$$\rho_{L,a} = \frac{1,293}{1 + \frac{16}{273,15}} = 1,2215 \text{ кг/м}^3.$$

2.1.2. Расчет внутренних теплопритоков

2.1.2.1. Эксплуатационные теплопритоки

• Теплоприток от освещения

Для стандартных камер хранения охлажденных продуктов, оснащенных специальными холодостойкими светильниками для влажных помещений, с родом защиты IP68 (непроницаемыми для пыли и воды под напором), где предусмотрена вспомогательная освещенность от 60 до 100 люкс по ДИН 5035, проектировщик в своих расчетах может исходить из тепловой нагрузки порядка 6 Вт/м².

Для приведенного выше примера получаем следующее:

$$Q_{\text{осв}} = 28,08 \text{ м}^2 \cdot 6 \text{ Вт/м}^2 = 168,48 \text{ Вт.}$$

Возможен расчет: в холодильной камере заказчиком предусмотрены 4 пластиковых светильника, мощностью каждый (вместе с предвключенным прибором) по 50 Вт.

Расчет теплового потока от освещения осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{осв}} = \frac{i \cdot p \cdot \tau}{24 \text{ часа}}, \text{ Вт,}$$

где i – число светильников, $i = 4$;

p – мощность светильников вместе с предвключенным прибором, $p = 50 \text{ Вт}$;

τ – продолжительность включения, как правило, 8 часов в сутки.

$$Q_{\text{осв}} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 8}{24} = 66,66 \text{ Вт.}$$

Выбирается наибольшее значение.

• Теплоприток от пребывания людей

Из табл. 2.5 определяется значение, равное 270 Вт из расчета на 1 человека при температуре камеры $t_R = 0^\circ\text{C}$.

Расчет теплопритока производится по формуле:

$$Q_{\text{л}} = \frac{i \cdot q \cdot \tau}{24 \text{ часа}}, \text{ Вт},$$

где i – число лиц (в данном случае 3);

q – удельный тепловой поток в зависимости от температуры холодильной камеры (270 Вт на человека);

τ – продолжительность пребывания людей в холодильной камере (обычно 8 часов в сутки).

Таблица 2.5. Теплоприток от пребывания людей

Температура камеры t_{R} , °С	Теплоприток q , Вт/1 чел.
20	180
15	200
10	210
5	240
0	270
-5	300
-10	330
-15	360
-20	390
-25	420

Итак: $Q_{\text{л}} = \frac{3 \cdot 270 \cdot 8}{24} = 270 \text{ Вт}.$

В расчетах необходимо учесть, что время (τ) освещения камеры и пребывания людей одинаково.

- *Теплоприток от оборудования*

В данном примере такой расчет не требуется; в других же случаях можно воспользоваться формулой, приведенной в пункте «Определение теплопритока от пребывания людей».

2.1.2.2. Теплопритоки от продуктов при их холодильной обработке

- *Теплоприток от охлаждаемого продукта*

По данным п.2.1.1.4 определяем ежедневно меняющуюся массу охлаждаемого продукта (в данном случае $m = 2457$ кг/сутки для мяса).

Значение удельной теплоемкости мяса берем из соответствующих таблиц свойств охлаждаемых продуктов. В приведенном выше примере была задана температура камеры $t_{\text{R}} = 0^{\circ}\text{C}$; с учетом этого для говядины удельная теплоемкость перед замораживанием $c = 3,2$ кДж/кг · К.

Далее, мясо с температурой в толще $+7^{\circ}\text{C}$ поступает на охлаждение.

Расчет теплопритока от мяса производится по формуле:

$$Q_{\text{A}} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{86400 \text{ с/сутки}}, \text{ кВт},$$

где m , кг/сутки; c , кДж/кг · К; ΔT , К.

Получаем: $\frac{\text{кг} \cdot \text{кДж} \cdot \text{К} \cdot \text{сутки}}{\text{сутки} \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{с}}$

$$Q_A = \frac{2457 \cdot 3,2 \cdot 7}{24 \cdot 2600} = 0,637.$$

$$Q_A = 637 \text{ Вт.}$$

• *Теплоприток при «дыхании» овощей и фруктов*

Здесь такой расчет не требуется, поскольку в данном случае речь идет исключительно о мясных продуктах.

В заключение все полученные результаты расчета заносят в сводную таблицу теплопритоков (табл. 2.5).

Вычисленный полный теплоприток, равный 1 902,89 Вт, соотносят с выбранной продолжительностью работы холодильной установки (16 часов в сутки) и определяют расчетную производительность испарителя (воздухоохладителя).

$$Q_{o, \text{расч}} = \frac{1903,89 \cdot 24}{16} = 2855,84 \text{ Вт.}$$

• *Теплоприток от электродвигателя вентилятора*

На этой стадии проектирования известна лишь предварительная производительность воздухоохладителя $Q_{o, \text{расч}}$. Но, поскольку он еще не выбран, нам не ясны ни его тип, ни количество двигателей вентиляторов, ни потребляемая ими мощность, ни электрическая мощность, идущая на нагрев при оттаивании.

На практике в таком случае поступают следующим образом.

Производительность $Q_{o, \text{расч}}$ увеличивают на 20% с учетом не известной пока производительности вентиляторов и мощности, идущей на нагрев при оттаивании, а после выбора параметров испарителя осуществляют перерасчет на основе новых данных с последующей проверкой результата.

$$Q_{o, \text{расч}} = 2856 \text{ Вт} + (0,2 \cdot 2856 \text{ Вт}) = 3427 \text{ Вт.}$$

Пример:

Программное обеспечение фирмы Кюба делает выбор в пользу следующего воздухоохладителя: потолочный (подвесной) воздухоохладитель типа DZBE 051 фирмы Кюба с техническими характеристиками: $Q_o = 3,70$ кВт при $t_{Li} = +2^\circ\text{C}$ и $\Delta T_i = 10$ К (рис. 2.5).

Рис. 2.5. Таблица параметров потолочного воздухоохладителя.

Потолочный воздухоохладитель Küba DZBE 051. Изделие № 2085.051

Холодопроизводительность Q_o , кВт	Температура воздуха на входе t_{Li} , °C	Температура кипения t_o , °C	Разность температур ΔT , К	Температура всасывания t_{oh} , °C	Хладагент	Число оборотов, n (в мин)
3,70	2,0	-8,0	10,0	-1,5	R134a	1400

Технические характеристики

Объемный расход воздуха: 2830 м ³ /час	Расчет оборудования на основе числа об. 1400 в мин	Эл. оттаивание: 230 В-1/400 В-3-У
Дальность обдува: 2 × 8,0 м	Q_o ($\Delta T_i = 10,0$ К): 3,70 кВт	Корпус: 2,46 кВт
Площадь: 19,8 м ²	t_{oh} ($\Delta T_i = 10,0$ К): -1,5°C	Ванна: 1,45 кВт
Расстояние между ребрами: 7,0 мм	t_o ($\Delta T_i = 10,0$ К): -8,0°C	Всего: 3,91 кВт
Емкость трубы: 5,4 л		

Таблица 2.6. (продолжение)

		Единица измерения	Итоговая графа		
3. Внутренние размеры теплоизоляции и штукатурки или облицовочной плитки, длина × ширина × высота		м	7,8 × 3,6 × 3,4		
4. Наружные размеры, длина × ширина × высота		м	8,0 × 3,8 × 3,4		
5. Объем камеры		м ³	95,47		
6. Параметры воздуха снаружи камеры	t_a φ_a	°С %	+16	70	
7. Параметры воздуха внутри камеры	t_i φ_i	°С %	±0	80	
8. Вид охлаждаемого продукта		–	говядина		
9. Суточный грузооборот		кг / сутки	2 457		
10. Начальная температура продукта при загрузке		°С	+7		
11. Общая масса продукта в холодильной камере		кг	9 828		
12. Пребывание обслуживающего персонала (человек в сутки)	Продолжительность пребывания	часов/сутки	3	8	
13. Освещение	Продолжительность включения	Вт часов/сутки	168,48		
14. Прочие тепловые потоки	Длительность действия	Вт часов/сутки	–	–	–
15. Теплоприток через стену 1		Вт	→	161,24	
16. Теплоприток через стену 2		Вт	→	37,21	
17. Теплоприток через стену 3		Вт	→	80,62	
18. Теплоприток через стену 4		Вт	→	37,21	
19. Теплоприток через дверь, Q_E		Вт	→	21,88	
20. Теплоприток через потолок, Q_E		Вт	→	85,36	
21. Теплоприток через пол, Q_E		Вт	→	113,39	
22. Коэффициент воздухообмена, n		1/сутки	7,16	–	
23. Энтальпия из h,x -диаграммы		кДж/кг	28,5	–	
24. Теплоприток от вентиляции, Q_L		Вт	→	291,50	
25. Суточный грузооборот		кг/сутки	2 457	–	
26. Удельная теплоемкость перед замораживанием, c		кДж/кг К	3,2	–	
27. Удельная теплоемкость после замораживания, c		кДж/кг К	–	–	
28. Энтальпия замораживания, q		кДж/кг	–	–	
29. Энтальпия «дыхания» овощей и фруктов, h		кДж/кг в сутки	–	–	
30. Разность температур ΔT		К	7	–	
31. Теплоприток от охлаждаемого продукта, Q_A		Вт	→	637	
32. Теплоприток от «дыхания» овощей, фруктов, Q_A		Вт	→		

Таблица 2.6. (окончание)

	Единица измерения		Итоговая графа
33. Тепло от каждого человека	Вт	270	–
34. Теплоприток от пребывания людей, $Q_{\text{л}}$	Вт	→	270
35. Теплоприток от освещения, $Q_{\text{осв}}$	Вт	→	168,48
36. Прочие теплопритоки, $Q_{\text{у}}$	Вт	→	–
37. Общий теплоприток, Q	Вт	+ →	1 903,89
38. Продолжительность работы холодильной установки	часов/сутки	(16) 18	–
39. Холодопроизводительность испарителя, предварительная, $Q_{\text{о,расч}}$	Вт	→	2 855,84
40. Температура кипения	°С	–8	–
41. Тип испарителя – согласно каталогу	–	DZBE 051	–
42. Теплоприток от вентиляторов	Вт	235	–
43. Длительность работы вентиляторов	часов/сутки	16	
44. Теплоприток от вентилятора испарителя, $Q_{\text{в}}$	Вт	→	235
45. Холодопроизводительность испарителя (полная)	Вт		–
46. Продолжительность оттаивания	часов/сутки		–
47. Теплоприток при оттаивании испарителя, $Q_{\text{от}}$	Вт	→	325
48. Холодопроизводительность испарителя, $Q_{\text{о,эфф}}$	Вт	+ →	3 415,84
49. Тип холодильной машины – согласно каталогу	–		–
50. Температуры кипения и конденсации	°С		–
51. Хладагент	R		–
52. Прочее			–

BFS – Государственный институт холодильной техники и техники кондиционирования воздуха

• *Теплоприток при оттаивании испарителя*

Из таблицы рекомендуемого времени оттаивания (см. Формулы, таблицы и диаграммы для холодильной техники, 3-е издание 2002 г., изд-во Мюллера, стр. 73) берем значение применительно к камере охлаждения мяса: 4 оттаивания в сутки, каждое по 20 минут.

Расчет теплопритока, вызываемого электрическим нагреванием испарителя для процесса оттаивания, осуществляется по уравнению:

$$Q_{\text{от}} = \frac{P \cdot \tau_{\text{от}}}{\tau_{\text{сут}}}, \text{ Вт,}$$

где P – теплопроизводительность электрообогревателя при оттаивании;

$\tau_{\text{от}}$ – продолжительность оттаивания, часов в сутки.

В результате получаем:

$$Q_{\text{от}} = \frac{3910 \cdot 1,33}{16} = 325 \text{ Вт.}$$

- *Определение эффективной холодопроизводительности испарителя*

Эффективная холодопроизводительность равна:

$Q_{o, \text{расч}}$ (2 856 Вт) + теплоприток от двигателя вентилятора (235 Вт) + теплоприток от нагрева при оттаивании (325 Вт). В итоге $Q_{o, \text{эфф}} = 3 416$ Вт.

2.1.3. Контрольные задания

1. Определить изменение температуры в направлении изнутри → наружу через конструкцию пола, приведенную в примере расчета камеры.

2. При проектировании камеры охлаждения для овощей и фруктов суммарный приток тепла (поз. 37 расчетного формуляра (табл. 2.5)) составляет 2 890 Вт. Какова будет предварительная производительность испарителя $Q_{o, \text{расч}}$ при длительности работы установки 18 часов в сутки?

3. Вычислить теплоту дыхания разных сортов овощей и фруктов, хранящихся до продажи в предназначенной для них холодильной камере при $+5^\circ\text{C}$? Допустим, это:

- 30 кг апельсинов,
- 50 кг яблок,
- 15 кг цветной капусты в полный лист,
- 100 кг раннего картофеля,
- 30 кг груш,
- 10 кг лимонов,
- 15 кг моркови с ботвой.

4. Рассчитать теплоприток в каждую из секций холодильной камеры с полом (см. комбинацию секций на рис. 2.6).

Дано: коэффициент теплопередачи для стен, потолков и пола $k = 0,19$ Вт/м² · К;

$\delta = 100$ мм, со всех сторон; $t_{\text{пола}} = +15^\circ\text{C}$;

$t_{\text{а}} = +25^\circ\text{C}$; $\phi_{\text{а}} = 70\%$, со всех сторон;

габаритные размеры секции 1: длина = 4,5 м; высота = 2,75 м; ширина = 3,0 м;

габаритные размеры секции 2: длина = 4,5 м; высота = 2,75 м; ширина = 4,5 м;

габаритные размеры секции 3: длина = 4,5 м; высота = 2,75 м; ширина = 4,2 м.

5. Вычислить теплоприток от охлаждаемого продукта, если в секции 2 (см. рис. 2.4) ежедневно требуется охлаждать 1,1 тонны говядины от начальной температуры $+7^\circ\text{C}$ при загрузке в камеру до температуры в толще мяса 0°C .

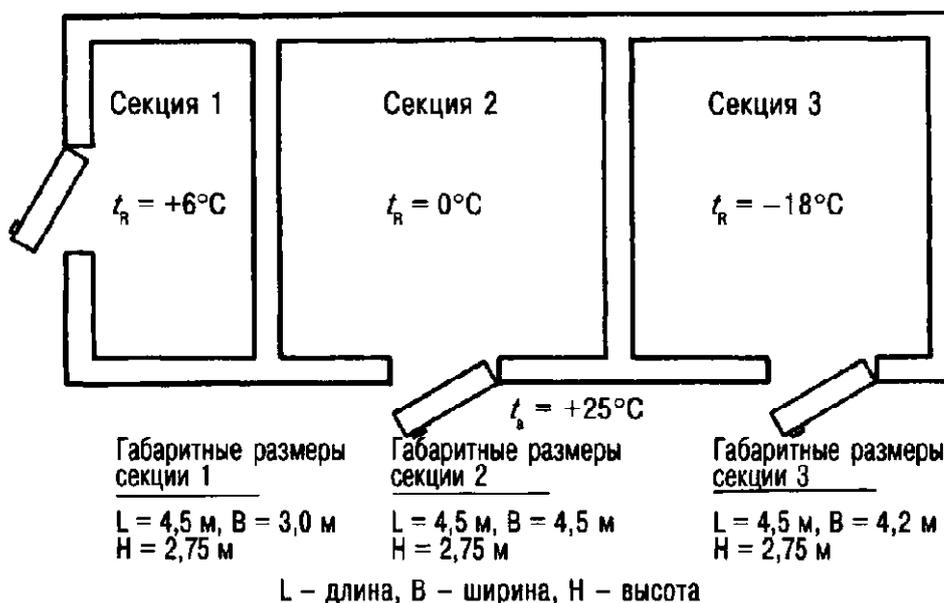


Рис. 2.6. Комбинация секций холодильной камеры

6. В морозильной камере (коэффициент теплопередачи $k = 0,13 \text{ Вт/м}^2$) при толщине стенки из жесткого пенополиуретана 150 мм в течение 8 часов в потоке холодного воздуха с $t_L = -35^\circ\text{C}$ следует замораживать 20 четвертин говяжьих туш до температуры в толще мяса -18°C . Начальная температура говядины при загрузке в холодильную камеру составляет $+7^\circ\text{C}$.

Определить теплоприток от охлаждаемого продукта (Вт·ч), а также требуемую мощность в кВт.

Варианты решений

1.

Формула для вычисления: $t_R = 0^\circ\text{C}$.

$$t_R - t_R^I = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{1}{a_1} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{1}{19} = 0,2125 \text{ К.}$$

$$t_R^I = 0,2125^\circ\text{C.}$$

$$t_R^I - t_B^I = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,015}{1,05} = 0,0577 \text{ К.}$$

$$t_B^I = 0,2702^\circ\text{C.}$$

$$t_B^I - t_B^{II} = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,05}{1,924} = 0,1049 \text{ К.}$$

$$t_B^{II} = 0,3751^\circ\text{C.}$$

$$t_B^{II} - t_B^{III} = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,10}{1,279} = 0,3157 \text{ К.}$$

$$t_B^{III} = 0,6908^\circ\text{C.}$$

$$t_B^{III} - t_B^{IV} = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_4}{\lambda_4} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,10}{1,030} = 13,46 \text{ К.}$$

$$t_B^{IV} = 15,15^\circ\text{C.}$$

$$t_B^{IV} - t_B^V = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_5}{\lambda_5} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,015}{0,16} = 0,3786 \text{ К.}$$

$$t_B^V = 14,5286^\circ\text{C.}$$

$$t_B^V - t_{\text{грунта}}^{\text{VI}} = k \cdot \Delta T_{\text{общ}} \frac{\delta_6}{\lambda_6} = 0,2692 \cdot 15 \cdot \frac{0,15}{1,279} = 0,4736 \text{ К.}$$

$$t_{\text{грунта}} = +15,00^\circ\text{C.}$$

2.

Полный теплоприток 2 890 Вт.

Продолжительность работы установки 18 часов в сутки.

Предварительная производительность испарителя:

$$\frac{\text{полный теплоприток} \cdot 24}{18}, \text{ Вт.}$$

Предварительная производительность испарения:

$$Q_{\text{о,расч}} = \frac{2\,890 \text{ Вт} \cdot 24 \cdot \text{часа} \cdot \text{сутки}}{18 \text{ часов} \cdot \text{сутки}} = 3\,853,33 \text{ Вт.}$$

3.

$$Q_{\text{дыхания}} = \frac{m \cdot q}{86\,400}, \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{апельсинов}} = \frac{30 \cdot 1,68}{86\,400} \cdot 1000 = 0,58 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{яблок}} = 1,11 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{цветной капусты}} = 0,78 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{картофеля}} = 3,47 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{груш}} = 0,32 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{лимонов}} = 0,49 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{моркови}} = 0,42 \text{ Вт}$$

$$Q_{\text{общее}} = 7,17 \text{ Вт}$$

m в кг; при расчете теплоты дыхания берется не суточный грузооборот m (кг/сутки), а масса всего уложенного на хранение продукта m (кг);
 q в кДж/кг · дней (значения из Формул, таблиц и диаграмм для холодильной техники, 3-е издание 2002, изд-во Мюллера, стр. 37 и далее);
 86 400 с/сутки;

$$\text{Получаем: } \frac{\text{кг} \cdot \text{кДж} \cdot \text{сутки}}{\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{сутки}} \cdot \frac{1000 \text{ Вт}}{\text{кВт}}, \text{ Вт.}$$

4.

Внутренние размеры холодильной камеры (секции 1):

длина = 4,3 м; ширина = 2,8 м; высота = 2,55 м.

$$Q_{E1} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 19 = 39,58;$$

$$Q_{E2} = (2,8 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 19 = 25,78;$$

$$Q_{E3} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 6 = -12,50 \text{ (теплоотдача в секцию 2);}$$

$$Q_{E4} = (2,8 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 19 = 25,78;$$

$$Q_{EB} = (4,3 \cdot 2,8) \cdot 0,19 \cdot 9 = 20,59;$$

$$Q_{ED} = (4,3 \cdot 2,8) \cdot 0,19 \cdot 9 = 43,46;$$

$$Q_{E, \text{общ}} = 142,69 \text{ Вт.}$$

Внутренние размеры холодильной камеры (секции 2):

длина = 4,3 м; ширина = 4,3 м; высота = 2,55 м.

$$Q_{E1} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 6 = 12,50;$$

$$Q_{E2} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 25 = 52,08;$$

$$Q_{E3} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 18 = -37,50 \text{ (теплоотдача в секцию 3);}$$

$$Q_{E4} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 25 = 52,08;$$

$$Q_{EB} = (4,3 \cdot 4,3) \cdot 0,19 \cdot 15 = 52,70;$$

$$Q_{ED} = (4,3 \cdot 4,3) \cdot 0,19 \cdot 25 = 87,83;$$

$$Q_{E, \text{общ}} = 219,69 \text{ Вт.}$$

Внутренние размеры холодильной камеры (секции 3):

длина = 4,3 м; ширина = 4,0 м; высота = 2,55 м.

$$Q_{E1} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 18 = 37,50;$$

$$Q_{E2} = (4,0 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 43 = 83,33;$$

$$Q_{E3} = (4,3 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 43 = 89,58;$$

$$Q_{E4} = (4,0 \cdot 2,55) \cdot 0,19 \cdot 43 = 83,33;$$

$$Q_{EB} = (4,3 \cdot 4,0) \cdot 0,19 \cdot 33 = 107,84;$$

$$Q_{ED} = (4,3 \cdot 4,0) \cdot 0,19 \cdot 43 = 140,52;$$

$$Q_{E, \text{общ}} = 542,10 \text{ Вт.}$$

5.

$$Q_A = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{86\,400}, \text{ кВт при } m, \text{ кг/сутки;}$$

c , кДж/кг · К;

ΔT , К;

86 400 с/сутки.

$$Q_A = \frac{1100 \cdot 3,2 \cdot 7}{86400} = 0,2852 \text{ кВт} = 285,2 \text{ Вт.}$$



6.

Удельная теплоемкость перед замораживанием: $c = 3,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$.Теплота замораживания: $q = 231 \text{ кДж/кг}$.Удельная теплоемкость после замораживания: $c = 1,7 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$.1 четвертина говядины обладает весом 75 кг; криосконическая температура замерзания: $-1,5^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{охл}} = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ при: } m, \text{ кг};$$

$$c, \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\Delta T, \text{ К}.$$

$$Q_{\text{охл}} = (20 \cdot 75) \cdot 3,2 \cdot 8,5 = 40\,800 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{зам}} = m \cdot q, \text{ кДж при: } m, \text{ кг};$$

$$q, \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{зам}} = (20 \cdot 75) \cdot 231 = 346\,500 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{переохл}} = m \cdot c \cdot \Delta T, \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{переохл}} = (20 \cdot 75) \cdot 1,7 \cdot 16,5 = 42\,075 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{зам}} + Q_{\text{переохл}}, \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{общ}} = 40\,800 + 346\,500 + 42\,075 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{общ}} = \frac{429375 \text{ кДж}}{3,6} = 119\,271 \text{ Вт} \cdot \text{ч}; \text{ кДж} : 3,6 = \text{Вт} \cdot \text{ч}.$$

$$Q_{\text{общ}} = 119\,271 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

$$Q_{\text{общ}} = \frac{119\,271 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{8 \text{ часов}} = 14\,909 \text{ Вт}.$$

$$Q_{\text{общ}} = 14,91 \text{ кВт}.$$