

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**О. В. Анистратова**

**ХОЛОДИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ  
ОБЩЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ**

Учебно-методическое пособие по практическим работам  
для студентов бакалавриата,  
обучающихся по направлению подготовки  
19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2022

УДК 641

Рецензент

кандидат технических наук, доцент, зам. директора института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «КГТУ» по основной образовательной деятельности, доцент кафедры технологии продуктов питания  
М. Н. Альшевская

Анистратова, О. В.

Холодильные технологии на предприятиях общественного питания: учеб.-методич. пособие по практическим работам для студ. бакалавриата по напр. подгот. 19.03.04 технология продукции и организация общественного питания / О. В. Анистратова – Калининград, 2022. – 49 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по проведению цикла практических работ по дисциплине «Холодильные технологии на предприятиях общественного питания» для студентов, обучающихся по направлению 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания.

Табл.7, рис. 8, список лит. – 7 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой технологии продуктов питания 29 сентября 2022 г., протокол № 2

Учебно-методическое пособие по практическим работам рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала и использованию в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» «30» сентября 2022 г., протокол № 10

УДК 641

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Анистратова О. В., 2022 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1.....	5
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2.....	14
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3.....	21
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4.....	27
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5.....	34
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	43

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Холодильные технологии на предприятиях общественного питания» является дисциплиной, формирующей у обучающихся готовность к подбору и эксплуатации различных видов холодильного оборудования, используемого на предприятиях общественного питания, а также способность осуществлять технологический процесс холодильной обработки продуктов.

Целью освоения дисциплины «Холодильные технологии на предприятиях общественного питания» является формирование знаний, умений и навыков в области холодильной техники и технологии, умения грамотно выбирать и использовать в своей практической деятельности технические средства холодильной обработки и хранения скоропортящихся продуктов.

Практическая подготовка обучающихся по данной дисциплине осуществляется, в том числе, проведением цикла практических работ, направленных на закрепление теоретических знаний и поэтапное формирование у обучающегося:

умения

- использовать технические средства для осуществления основных холодильных технологических процессов на предприятиях общественного питания;

- измерять основные параметры холодильных технологических процессов;

- организовать и осуществлять технологический процесс холодильной обработки продуктов общественного питания.

Наименование практических работ и количество часов занятий определены в табл. 1 для очной и заочной форм обучения.

Таблица 1 – Содержание практических работ

Содержание практической работы (занятия)	Количество ПЗ	
	очная форма, ч	заочная форма, ч
Решение задач по расчету толщины теплоизоляции, теплопотоков	4	-
Построение цикла паровой холодильной машины и определение основных характеристик цикла	2	2
Расчет теплофизических характеристик пищевых продуктов	2	-
Расчет продолжительности охлаждения продуктов	2	
Расчет продолжительности замораживания и размораживания продуктов	4	2
Итого	14	4

Оценка результатов выполнения заданий по каждой практической работе производится при представлении студентом отчета по практической работе, демонстрации преподавателю исполнения расчетного задания и на основании

ответов студента на вопросы по тематике практической работы. При оформлении практического занятия в тетради обучающийся должен обязательно указать номер и тему занятия, её цель. Далее необходимо оформить ход практического занятия, оставив место для расчётных данных. В конце практического занятия обучающийся должен подвести итоги работы и сделать выводы.

Оценка «зачтено» по практическому занятию студенту выставляется при правильном решении практических задач по теме занятия, оформлении отчета, в который включены ответы на вопросы для самостоятельного обучения и его защите.

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом его индивидуальных психофизических особенностей.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1** **«РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТУ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ,** **ТЕПЛОПРИТОКОВ»**

*Цель занятия:* приобретение умений по расчету толщины теплоизоляции, теплопритоков при использовании холодильного оборудования.

### **Ход работы**

**Задание 1.** Провести решение задач по расчетам толщины теплоизоляции, теплопритоков в соответствии с вариантами заданий, указанными преподавателями. Сделать вывод о проделанной работе.

### **Теоретические сведения**

#### **1. Расчет изоляции**

Расчет изоляции заключается в определении толщины изоляционного слоя, исходя из установленного нормативного значения коэффициента теплопередачи соответствующего ограждения.

Толщину изоляционного слоя ограждения (в м) определяют по формуле (1).

$$\delta_{\text{изл}} = \lambda_{\text{изл}} \cdot \left[ \frac{1}{K} - \left( \frac{1}{a_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_b} \right) \right]. \quad (1)$$

$K$  – коэффициент теплопередачи ограждения, принимаемый в зависимости от характера ограждения и температур по обе стороны от него, Вт/(м<sup>2</sup>·град.) (приложение А);  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  – толщина слоев конструкции ограждения, м;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – коэффициенты теплопроводности строительных материалов, составляющих конструкцию ограждения Вт/(м·К);  $\lambda_{\text{изл}}$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляции, принимаемый по приложению

3, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $a_n$ ,  $a_e$  – коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней стороны стены, принимаемые по приложению А, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Величины  $\frac{1}{a}$  и  $\frac{\delta}{\lambda}$  называются термическими сопротивлениями, а  $\frac{1}{K}$  общим термическим сопротивлением (приложение А).

Пока наиболее распространенными теплоизоляционными материалами в строительстве холодильников является пенополистирол марки ПСБ-С. Изделия из него выпускаются в виде плит длиной от 900 до 2000 мм с интервалом 500 мм, шириной от 500 до 1000 мм с тем же интервалом, толщиной 25, 30, 50 и 100 мм.

Для защиты теплоизоляционных конструкций от проникновения в них влаги применяются гидроизоляционные материалы: битум, борулигидрозол, толь, рубероид, пленки из полиэтилена, полиамидные пленки и другие материалы.

Теплоизоляцию следует располагать с более холодной стороны, то есть с внутренней стороны ограждения камеры. Перегородки между холодными камерами выполняют из жестких плитных материалов или пенобетонных блоков. Перегородки из жестких плитных материалов по толщине бывают двухслойные (100 мм), трехслойные (150 мм) и четырехслойные (200 мм). Перегородки из пенобетона проектируются толщиной 250, 400 мм.

На рис. 1–2 показаны строительно-изоляционные конструкции наружной стены и покрытия холодильника.

При использовании плитных материалов после расчета толщины изоляционного слоя может оказаться, что расчетная величина не соответствует стандартной толщине выпускаемых плит. В этом случае необходимо принять толщину изоляционного слоя краткой стандартной толщине плит и определить действительное значение коэффициента теплопередачи ограждения, которое в дальнейшем будет использовано в расчетах.

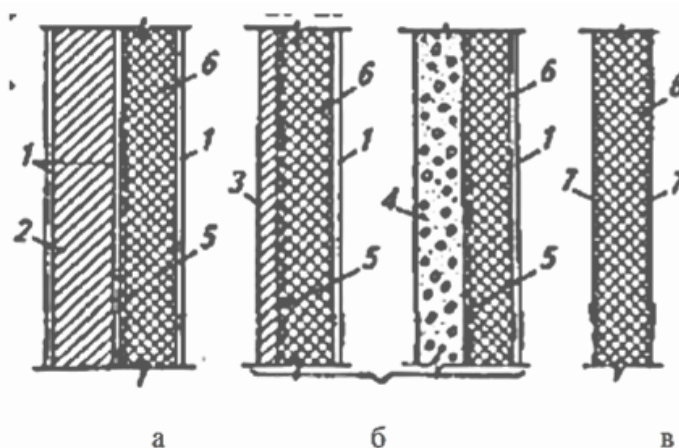


Рисунок 1 – Изоляция наружных стен одноэтажного холодильника:

- а, б, в – варианты изоляции наружных стен холодильников; 1 – слой штукатурки; 2 – кирпичная кладка; 3 – железобетонная плита; 4 – керамзитшлакобетонная плита; 5 – пароизоляция; 6 – теплоизоляция; 7 – металлический лист

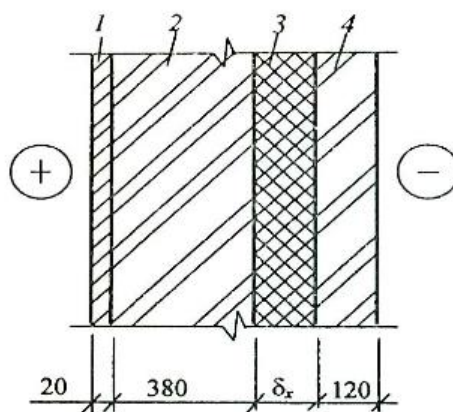


Рисунок 2 – Конструкция наружной стены:

1 – внутренняя штукатурка; 2 – основной конструктивный слой (кирпичная кладка);  
3 – теплоизоляционный слой; 4 – облицовочный кирпич

Действительное значение коэффициента теплопередачи определяют по формуле 2:

$$K_{\text{действ}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a_{\text{н}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{\text{в}}}\right) + \frac{\delta_{\text{изл}}}{\lambda_{\text{изл}}}}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{изл}}$  – действительная толщина теплоизоляции, м.

Аналогичным методом производят подбор строительно-изоляционной конструкции, расчет толщины и коэффициента теплопередачи для остальных ограждений по всем наружным и внутренним стенам, потолочному и половому перекрытиям.

## 2. Расчет теплопритоков в камере холодильника

Расчет проводится для каждого охлаждаемого помещения отдельно.

Учитываются теплопритоки, влияющие на изменения температурного режима в охлаждаемых камерах.

Исходными данными для проведения теплового расчета являются:

- план охлаждаемых камер, отделений и их размеры;
- принятые значения коэффициентов теплопередачи ограждений;
- температура и влажность наружного воздуха, воздуха смежных помещений, грунта
- температура и количество поступающих грузов.

### 2.1. Теплопритоки через ограждения

Приток тепла через ограждающие конструкции путем теплопередачи вследствие наличия разности температур определяется как сумма теплопритоков (через стены, перегородки, перекрытия или покрытия через полы, заглубленные неизолированные стены подвальных помещений. Данным расчетом определяется общий расход холода, необходимый для поддержания постоянства температур в камерах. Теплопритоки через стены, перегородки, покрытия или перекрытия  $Q_{\text{ограж.}}$  (Вт) можно определить по формуле (3).

$$Q_{\text{ограж}} = K_{\text{действ}} \cdot S \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{в}}), \quad (3)$$

$K_{\text{действ}}$  – действительный коэффициент теплопередачи ограждения, определенный при расчете толщины изоляционного слоя по формуле (2), Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – площадь поверхности ограждения, м;  $t_{\text{н}}$  – температура снаружи ограждения, °С;  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха внутри охлаждаемого помещения, °С.

Теплопередающие поверхности для пола и потолка камер равны площади между внутренней поверхностью наружных стен и осью внутренних. При определении теплопередающей поверхности стен высота считается от уровня чистого пола камеры до уровня чистого пола вышележащего этажа или до верха засыпки покрытия. Длина наружных стен считается между осями внутренних стен или от наружной поверхности наружных стен до осевнутренних; длина внутренних стен – между внутренней поверхностью наружной стены и осью внутренней стены или между осями внутренних стен.

Поскольку поверхность наружных стен и покрытий холодильных камер может дополнительно облучаться солнцем, следует определить теплопритоки за счет воздействия солнечной радиации. Теплоприток от солнечной радиации определяют по формуле (4).

$$Q_{\text{с.р.}} = K_{\text{действ}} \cdot S \cdot \Delta t_{\text{с}} \text{ (Вт)}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{действ}}$  – действительный коэффициент теплопередачи ограждения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – площадь поверхности ограждения, облучаемой солнцем, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{\text{с}}$  – избыточная разность температур, характеризующая действия солнечной радиации в летнее время, °С.

Избыточную разность температур принимают по таблице приложения Б.

По каждой камере определяют теплопритоки  $Q_{\text{с.р.}}$ , значения которых затем заносят в сводную табл. 2.

Теплоприток через ограждения за счет теплопередачи по всем камерам равен сумме теплопритоков по каждой камере.

Результаты расчета теплопритоков через конструкции ограждений сводят в табл. 2.



Таблица 2 – Теплопритоки через ограждения путем теплопередачи и солнечной радиации (сводная таблица)

№ п/п	Ограждения	$K_{дей}, Вт/(м^2 \cdot град).$	$S, м^2$	$\Delta t_c, ^\circ C$	$t_{ср} - t_{в}, ^\circ C$	$Q_{ограж}$	$Q_{с.р}$	$Q_1 = Q_{ограж} + Q_{с.р}$
Наименование камеры №1								
1	Стена №1							
2	Стена №2							
3	Стена №3							
4	Стена №4							
5	Пол							
6	Потолок							
Итого:								

## 2.2. Теплопритоки от поступающих продуктов и тары

Тепло отводится от продуктов при охлаждении, замораживании, подмораживании. Для любого вида холодильной обработки количество отводимого тепла  $Q_2$  (Вт) можно определить по формуле (5)

$$Q_2 = (G_{пр} \cdot C_{пр} + G_T \cdot C_T)(t_{пр.н} - t_{пр.к}) \cdot \frac{1}{\tau_{хол.об} \cdot 3600}, \quad (5)$$

$G_{пр}, G_T$  – суточное поступление продукта и тары в охлаждаемое помещение, кг/сут;  $C_{пр}, C_T$  – удельная теплоемкость продукта и тары, (Дж/кг·К) (приложение В);  $t_{пр.н}, t_{пр.к}$  – температуры, с которыми продукты поступают в камеру и приобретают к концу холодильной обработки,  $^\circ C$ ;  $\tau_{хол.об}$  – продолжительность холодильной обработки и хранения, ч

Удельную теплоемкость тары принимают по материалу, из которого она изготовлена (Дж/кг·К):

деревянная.....2500  
 картонная..... 1460  
 металлическая..... 460  
 стеклянная..... 835

Для холодильников проектируемого предприятия общественного питания суточное поступление в охлаждаемую камеру продуктов ( $G_{пр}$ ) принимается в зависимости от продолжительности их хранения. Если

продолжительность хранения продукта составляет один-два дня, то вес продуктов принимается равным 100 %, при 3-4-дневном хранении – 50–60 % и при хранении свыше четырех дней (но не более 10) – 40 % емкости камеры от максимального количества данного продукта в камере.

Суточное поступление тары в расчетах принимают: деревянной и стальной – 20, картонной – 10, стеклянной – 100 % от суточного поступления продукта.

Результаты расчетов тепла, вносимого в камеры с продуктами и тарой, заносят в сводную табл. 3.

Таблица 3 – Теплоприток от грузов (сводная таблица)

Камера, наименование продуктов	G <sub>прод.</sub> кг/сут	C <sub>прод.</sub> , Дж/кг·град	G <sub>т</sub> , кг/сут	C <sub>т</sub> , Дж/кг·град	τ, сут	t <sub>пр 1</sub> , °C	t <sub>пр 2</sub> , °C	Сумма Q <sub>2</sub> (Вт)
Название камеры								
Сливочное масло, молоко и т.д. (пример)								

### 2.3. Теплопритоки при вентиляции помещений

Теплоприток от наружного воздуха при вентиляции (Q<sub>3</sub>) рассчитывают по формуле (6)

$$Q_3 = \frac{V \cdot a \cdot \rho_v}{24 \cdot 3600}, \quad (6)$$

V – объем вентилируемого помещения, м<sup>3</sup>; a – кратность воздухообмена; ρ<sub>v</sub> – плотность воздуха при температуре и относительной влажности воздуха в камере, кг/ м<sup>3</sup>; i<sub>н</sub> – удельная энтальпия наружного воздуха, Дж/кг; i<sub>в</sub> – удельная энтальпия воздуха в камере, Дж/кг.

Кратность вентиляции охлаждаемых камер принимают обычно от 1 до 4 в сутки.

Плотность воздуха зависит в первую очередь от температуры и может быть подсчитана по формуле (7)

$$\rho = 1,293 \frac{273}{273 + t_v}, \quad (7)$$

ρ – плотность воздуха, кг/ м<sup>3</sup>; t<sub>в</sub> – температура воздуха в охлаждаемой камере, °C.

Если в камере вентиляция не предусмотрена, Q<sub>3</sub> = 0.

### 2.4. Эксплуатационные теплопритоки

Эти теплопритоки возникают вследствие освещения камер, пребывания в них людей, работы электродвигателей, открывания дверей. Теплопритоки определяют по каждой статье отдельно.

Теплоприток от освещения  $Q_{4.1}$  (Вт) рассчитывают по формуле (8)

$$Q_{4.1} = AF, \quad (8)$$

где  $A$  – количество тепла, выделяемого освещением в ед. времени на  $1 \text{ м}^2$  площади пола. Вт/  $\text{м}^2$ ;  $F$  – площадь камеры,  $\text{м}^2$ .

Количество тепла, выделяемого на  $1 \text{ м}^2$  площади пола, с учетом коэффициента одновременности включения можно принимать для складских помещений, камер хранения  $1,2 \text{ Вт/ м}^2$ .

Теплоприток от пребывания людей  $Q_{4.2}$  (Вт) рассчитывают по формуле (9)

$$Q_{4.2} = 350n, \quad (9)$$

где  $350$  – тепловыделение одного человека при тяжелой физической работе, Вт;  $n$  – число людей, работающих в данном помещении.

Теплоприток от работающих электродвигателей  $Q_{4.3}$  (Вт) рассчитывают по формуле (10)

$$Q_{4.3} = 1000N, \quad (10)$$

где  $N$  – мощность электродвигателя, кВт.

Теплоприток при открывании дверей  $Q_{4.4}$  (Вт) рассчитывают по формуле (11)

$$Q_{4.4} = VF, \quad (11)$$

где  $V$  – удельный приток тепла от открывания дверей, Вт/  $\text{м}^2$ ;  $F$  – площадь камеры,  $\text{м}^2$

Эксплуатационные теплопритоки определяются как сумма теплопритоков (Вт) отдельных видов (формула (12))

$$Q_4 = Q_{4.1} + Q_{4.2} + Q_{4.3} + Q_{4.4}. \quad (12)$$

Общий расход холода всего охлаждаемого блока камер определяется суммированием расходов холода каждой камерой (формула (13))

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (13)$$

Для предприятий торговли и общественного питания малой мощности эксплуатационные теплопритоки можно принимать в зависимости от теплопритока через ограждения ( $Q_1$ ) и площади камеры ( $F$ ):

$$\begin{aligned} Q_4 &= 0,4Q_1 \text{ при } F < 10 \text{ м}^2; \\ Q_4 &= 0,3Q_1 \text{ при } 10 \leq F \leq 20 \text{ м}^2; \\ Q_4 &= 0,2Q_1 \text{ при } F > 20 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

## Примеры решения задач

1. Определить толщину изоляционного слоя наружной стены камер хранения мороженных грузов холодильника, расположенного в г. Грозном и действительное значение коэффициента теплопередачи.

Конструкция наружной стены холодильника типовая (рис. 3): кирпичная кладка в полтора кирпича (380 мм), покрытая с двух сторон цементной штукатуркой (по 20 мм). Пароизоляционный слой состоит из двух слоев битумной мастики и одного слоя гидроизола (общая толщина 4 мм). В качестве теплоизоляции применены плиты из пенопласта полистирольного. Отделочный слой – штукатурка цементно-известковая по сетке (в расчете для упрощения будут приняты три слоя цементной штукатурки толщиной 20 мм каждая).

Коэффициенты теплопроводности материалов (Вт/м·К):

Штукатурка цементная 0,88

Кладка кирпичная 0,82

Пароизоляции 0,3

Пенопласт полистирольный 0,047

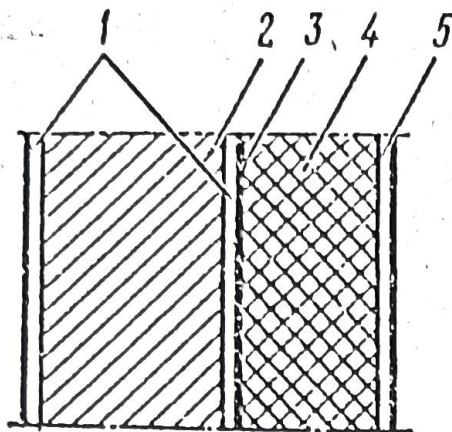


Рисунок 3 – Конструкция наружной стены холодильника:

а – наружная стена; 1 – штукатурка цементная; 2 – кладка кирпичная; 3 – пароизоляция; 4 – теплоизоляция; 5 – отделочный слой

По табл. П.Б.1 принимаем среднегодовую температуру воздуха г. Грозном 10,1 °С. Следовательно, город расположен в южной климатической зоне. Коэффициент теплопередачи для камер хранения мороженных грузов с температурой минус 20 °С определяем по табл. П.А.1  $k_0 = 0,21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Коэффициенты теплопередачи и соответствующие термические сопротивления:

$$\text{для наружной поверхности } a_H = 23,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \frac{1}{a_H} = 0,043 \text{ м}^2 \cdot \frac{\text{К}}{\text{Вт}};$$

$$\text{для внутренней (циркуляция воздуха в камерах естественная)} \quad a_B = 8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \frac{1}{a_B} = 0,125 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

Потребную толщину изоляционного слоя определяем по формуле (1):

$$\delta_{\text{изл}} = 0,047 \left[ \frac{1}{0,21} - \left( \frac{1}{23,3} + 3 \frac{0,02}{0,88} + \frac{0,38}{0,82} + \frac{0,004}{0,3} + \frac{1}{8} \right) \right] = 0,047 [4,762 - (0,043 + 0,068 + 0,463 + 0,013 + 0,125)] = 0,047(4,762 - 0,712) = 0,047 \cdot 4,05 = 0,190 \text{ м.}$$

Принимаем толщину изоляционного слоя 200 мм (четыре слоя по 50 мм или два слоя по 100 мм). Действительное значение коэффициента теплопередачи рассчитываем по формуле (2):

$$k_d = \frac{1}{0,712 + \frac{0,2}{0,047}} = \frac{1}{0,712 + 4,255} = \frac{1}{4,967} = 0,20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Ответ:  $\delta_{\text{изл}}=0,190\text{м}$ ,  $k_d=0,20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

### Варианты задач

1. Определить толщину изоляционного слоя наружной стены камер хранения охлажденных грузов холодильника, расположенного в г. Грозном, конструкция стен и коэффициенты теплопроводности материалов указаны в примере решения.

2. Определить толщину изоляционного слоя перегородки между камерами хранения охлажденных грузов в городе Калининграде. Коэффициенты теплопроводности материала (пенобетон) 0,15 (Вт/м·К), циркуляция воздуха умеренная.

### Отчет о проделанной работе должен содержать:

- цель работы;
- решение задач.

### Контрольные вопросы

1. Что является исходными данными для проведения теплового расчета?
2. Какие гидроизоляционные материалы применяются для защиты теплоизоляционных конструкций от проникновения в них влаги?
3. В результате чего возникают эксплуатационные теплопритоки?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### ПОСТРОЕНИЕ ЦИКЛА ПАРОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛА

*Цель занятия:* приобретение умений по построению цикла паровой холодильной машины и определение основных характеристик цикла.

#### **Ход работы**

**Задание 1.** Провести решение задач по построению цикла паровой холодильной машины и определение основных характеристик цикла с вариантами заданий, указанными преподавателями (табл. 6). Сделать вывод о проделанной работе.

#### **Теоретические сведения**

Охлаждение осуществляется, когда между телами происходит теплообмен. А это возможно, если тела имеют различные температуры. Для обеспечения непрерывности процесса теплоотвод должен функционировать постоянно. Это возможно, если обеспечить постоянное восстановление первоначального состояния источника низкой температуры. Этот метод непрерывного получения низкой температуры широко применяется в холодильной технике с использованием различных холодильных машин.

Для охлаждения машинными способами помимо охлаждаемого тела и приемника теплоты (окружающей среды) требуется еще третье тело, переносящее теплоту от первого ко второму. Это третье тело называется рабочим телом или холодильным агентом (хладагентом).

Холодильный агент, претерпевая ряд фазовых изменений, возвращается в первоначальное состояние, совершая непрерывно круговой процесс (цикл).

В отличие от прямого цикла (цикл тепловой машины), когда работа производится при переходе теплоты от более нагретого тела к менее нагретому телу, круговой процесс, в котором для передачи теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу необходимо подводить работу (или теплоту), называется обратным циклом.

Если при осуществлении процессов, образующих обратный цикл, у взаимодействующих тел не наблюдаются остаточные изменения, т.е. эти процессы обратимы, то и обратный цикл обратим. На осуществление обратимого цикла требуется минимум работы или теплоты, поэтому он является эталоном. Обратимый холодильный цикл 1–2–3–4, приведенный на рис. 4, показан на диаграмме  $S-T$  (энтропия – абсолютная температура). Он состоит из двух изотермических (4–1) и (2–3), двух адиабатических (1–2) и (3–4) процессов. Такой цикл называется циклом Карно (рис.4). Холодильный агент получает теплоту от охлаждаемого тела и передавать ее окружающей среде при постоянных температурах.

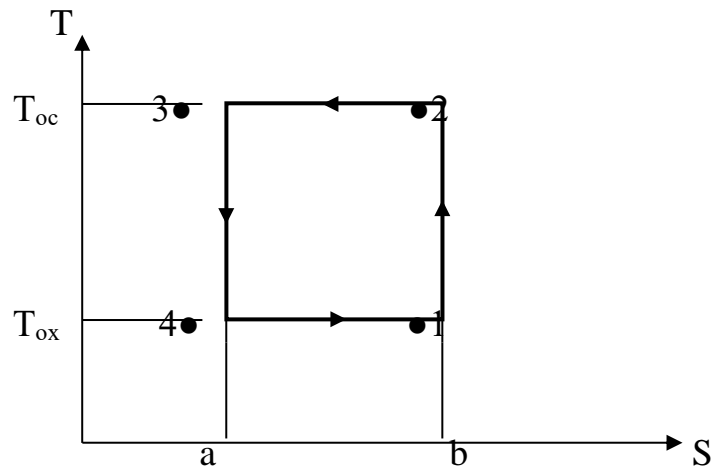


Рисунок 4 – Обратный цикл Карно

На участке 4–1 кругового процесса (рис. 4) холодильный агент в результате теплообмена получает теплоту от охлаждаемого тела. Полученная теплота передается на участке 2–3 приемнику теплоты, которым является обычно окружающая среда (атмосферный воздух, вода). Но самопроизвольно такой переход теплоты невозможен, так как температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ) выше, чем температура холодильного агента ( $T_{ox}$ ).

Для того чтобы холодильный агент мог передать полученную теплоту окружающей среде, необходимо подвести к нему энергию в виде работы или теплоту (участок 1–2). Это способствует повышению его температуры настолько, чтобы холодильный агент мог самопроизвольно передать полученную в предшествующих процессах теплоту окружающей среде. На участке (3–4) хладагент возвращается в первоначальное состояние.

В изотермическом процессе 4–1 каждый килограмм циркулирующего холодильного агента получает от охлаждаемого тела теплоту  $q_o$ , которая называется удельной массовой холодопроизводительностью холодильного агента и выражается площадью 4–1–b–a–4 (формула (14))

$$q_o = T_{ox}(S_b - S_a). \quad (14)$$

В процессе 1–2 при затрате работы  $l_{сж}$  холодильный агент адиабатически сжимается и его температура повышается от  $T_{ox}$  до  $T_{oc}$ .

В изотермическом процессе 2–3 каждый килограмм циркулирующего холодильного агента отдает окружающей среде теплоту  $q_k$ , измеряемую площадью 2–3–a–b–2 (формула (15))

$$q_k = T_{oc}(S_b - S_a). \quad (15)$$

В адиабатическом процессе 3–4 холодильный агент расширяется с получением работы  $l_p$  и в результате температура хладагента понижается от  $T_{oc}$  до  $T_{ox}$ .

Работа цикла  $l_{ц}$  превращается в теплоту, подводимую к холодильному агенту, и определяется как разность работ, затраченной на сжатие холодильного агента  $l_{сж}$  и полученной при его расширении  $l_{р}$  (формула (16))

$$l_{ц} = l_{сж} - l_{р} . \quad (16)$$

В соответствии с первым началом термодинамики сумма энергии, подведенной к холодильному агенту, должна равняться сумме энергии, отведенной от него (формулы (17), (18))

$$q = q_o + l_{ц}, \quad (17)$$

отсюда

$$l_{ц} = q - q_o. \quad (18)$$

В S–T диаграмме работа цикла выражается площадью 1–2–3–4–1.

Отношение теплоты  $q_o$ , приобретенной холодильным агентом от охлаждаемого тела, к работе цикла « $l_{ц}$ », называется холодильным коэффициентом (формула (19))

$$\varepsilon = \frac{q_o}{l_{ц}}. \quad (19)$$

Холодильный коэффициент характеризует эффективность осуществления холодильного цикла. Его можно выразить через температуры (формула (20))

$$\varepsilon = \frac{T_{ох}}{T_{ос} - T_{ох}}. \quad (20)$$

Из этого выражения следует, что при температуре окружающей среды  $T_{ос}$ , затрата работы на единицу отведенной теплоты будет тем больше, чем ниже температура  $T_{ох}$ . Совокупность технических устройств, обеспечивающих осуществление холодильного цикла, и называется холодильной машиной.

Реальные циклы являются необратимыми вследствие необратимости действительных процессов: теплообмена с окружающей средой, расширения и сжатия хладагента, из-за наличия трения, при прохождении жидкости в дроссельном устройстве и т. д.

На рис. 5 и 6 изображены принципиальная схема и цикл в диаграмме  $I - l_{гр}$  паровой одноступенчатой холодильной машины.



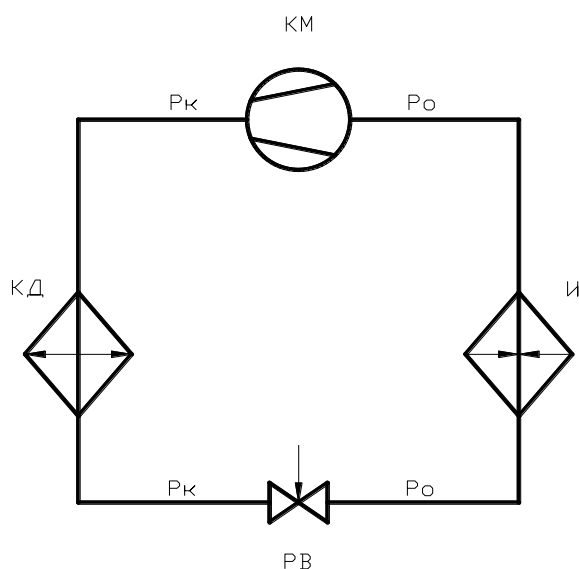


Рисунок 5 – Принципиальная схема одноступенчатой холодильной машины

Расчет основных теплофизических характеристик холодильной машины сводится к определению следующих величин:

- удельная массовая холодопроизводительность (кДж/кг) определяется по формуле (21)

$$Q_o = i_{1'} - i_4 ; \quad (21)$$

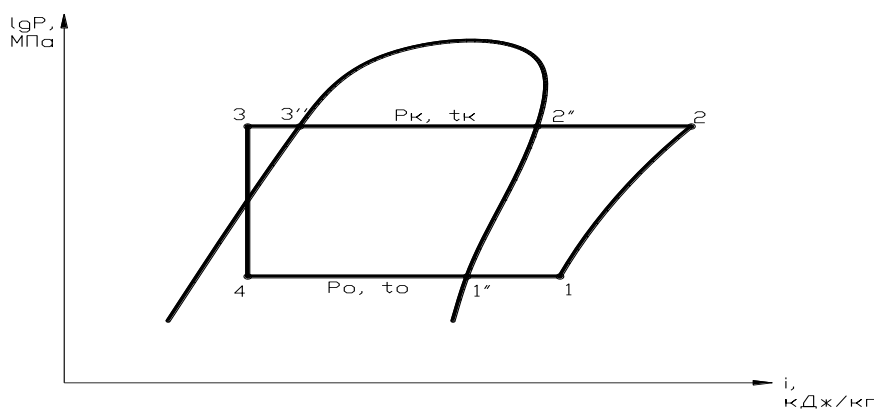


Рисунок 6 – Цикл одноступенчатой холодильной машины

- удельная работа сжатия холодильного агента в компрессоре (кДж/кг) по формуле (22)

$$l = i_2 - i_1 ; \quad (22)$$

- удельная теплота, отводимая от холодильного агента в конденсаторе (кДж/кг) по формуле (23)

$$q_k = i_2 + i_3 ; \quad (23)$$

- уравнение теплового баланса имеет вид (формула (24))

$$q_k = q_o + l; \quad (24)$$

- холодильный коэффициент теоретического цикла (кг/с) (формула (25))

$$e = q_o/l. \quad (25)$$

Термодинамическое совершенствование цикла определяется сопоставлением его с обратимым циклом, имеющим ту же величину удельной массовой холодопроизводительности, и оценивается коэффициентом обратимости равным отношению холодильных коэффициентов реального цикла и цикла Карно.

Холодильный коэффициент обратимого цикла Карно больше холодильного коэффициента любого из циклов, осуществляемых в тех же температурных пределах, поэтому чем больше необратимость реального цикла, тем большую работу надо затратить для его осуществления.

### Примеры решения задач

#### Задача 1

Построить обратный холодильный цикл Карно в диаграмме  $i-lgp$ , определить параметры точек и выполнить расчет цикла для  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ;  $t_k = 30^\circ\text{C}$ , если рабочее тело аммиак. Определить холодопроизводительность, работу цикла, холодильный коэффициент.

Построение цикла осуществляют следующим образом (рис. 7). Проводят изотерму  $t = 30^\circ\text{C}$ , в точке пересечения изотермы с правой пограничной кривой будет находиться точка 2, а в точке пересечения с левой пограничной кривой точка 3. Из этих точек проводят линии  $S = \text{const}$  до пересечения с изотермой для  $t_0 = -10^\circ\text{C}$  и ставят соответственно, точки 1 и 4. Параметры точек 2 и 3, 1 и 4 по диаграмме  $i-lgp$  (приложение В, рис. П.В.1 (R22)) и записывают в табл. 4.

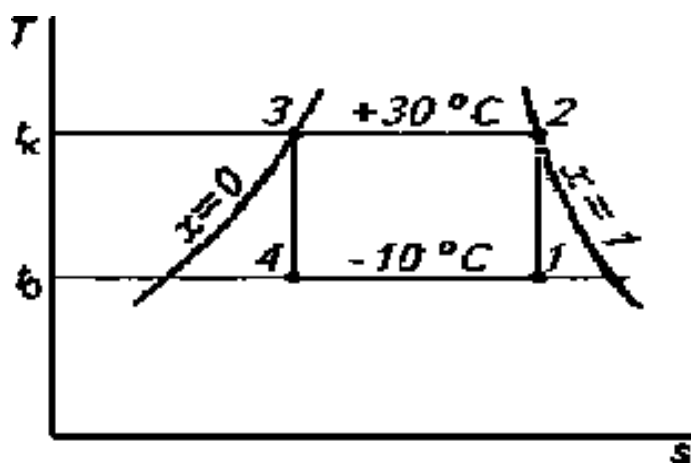


Рисунок 7 – К расчету обратного холодильного цикла Карно

Таблица 4 – Параметры точек цикла

Точка	t, °C	P, МПа	i, кДж/кг
1	-10	0,290	1525
2	+30	1,166	1706
3	+30	1,166	561
4	-10	0,290	550

Пользуясь данными табл. 4, получим:

$$\begin{aligned}
 q_0 &= i_1 - i_4 = 1525 - 550 = 975 \text{ кДж/кг}; \\
 l_{\text{сж}} &= i_2 - i_1 = 1706 - 1525 = 181 \text{ кДж/кг}; \\
 &= i_2 - i_3 = 1706 - 561 = 1145 \text{ кДж/кг}; \\
 l_p &= i_3 - i_4 = 561 - 550 = 11 \text{ кДж/кг}; \\
 l_{\text{ц}} &= l_{\text{сж}} - l_p = 181 - 11 = 170 \text{ кДж/кг}; \\
 E &= q_0 - l_{\text{ц}} = 975 - 170 = 805.
 \end{aligned}$$

Ответ:

$$q_0 = 975 \text{ кДж/кг};$$

$$l_{\text{ц}} = 170 \text{ кДж/кг};$$

$$E = 805.$$

### Задача 2

Определить параметры точек и провести расчет цикла паровой аммиачной компрессионной холодильной машины холодопроизводительность, работу цикла, холодильный коэффициент, если дано:

$$t_0 = -10 \text{ °C}; t_k = 30 \text{ °C}; t_{\text{п}} = 25 \text{ °C}; t_{\text{вс}} = 0 \text{ °C}.$$

Таблица параметров точек (табл. 5) одноступенчатого цикла для R717 по диаграмме *i-lgr* (приложение В).

Таблица 5 – Параметры точек цикла

Точка	t, °C	p, МПа	i, кДж/кг
1	-10	0,290	1670
1'	0	0,290	1690
2	+100	1,166	1900
2'	+30	1,166	1706
3	+30	1,166	561
3'	+25	1,166	536
4	-10	0,290	536

1.  $q_0 = i_1 - i_4 = 1670 - 536 = 1134$  кДж/кг;
2.  $l_{ц} = i_2 - i_1' = 1900 - 1690 = 210$  кДж/кг;
3.  $E = q_0 / l_{ц} = 134/230 = 5,4$ .

### Варианты задач

1. Определить параметры точек и провести расчет одноступенчатого цикла для R717 (холодопроизводительность, работу цикла, холодильный коэффициент) по вариантам, указанным в табл. 6.

Таблица 6 – Варианты заданий

№ п/п	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_{п}, ^\circ\text{C}$	$t_{вс}, ^\circ\text{C}$
1	-40	+19	+11	0
2	-39	+18	+12	0
3	-38	+17	+13	0
4	-37	+16	+14	0
5	-36	+15	+15	0
6	-35	+14	+16	0
7	-34	+13	+17	0
8	-33	+12	+18	0
9	-32	+11	+19	0
10	-31	+10	+20	0

### Отчет о проделанной работе должен содержать:

- цель работы;
- решение задач.

### Контрольные вопросы

1. Как изображается теплота и работа для адиабатического процесса в диаграмме  $i$ -lgP, T-S
2. Как определить параметры насыщенное жидкости и сухого пара по таблице хладогентов?
3. Что такое холодильный коэффициент?

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

## РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

*Цель занятия:* приобретение умений по расчету теплофизических характеристик пищевых продуктов.

#### Ход работы

**Задание 1.** Провести решение задач по расчетам расхода холода и продолжительности охлаждения в соответствии с вариантами заданий, указанными преподавателями. Сделать вывод о проделанной работе.

#### Теоретическая часть

К наиболее важным теплофизическим свойствам пищевых продуктов относят удельную теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, удельную энтальпию, криоскопическую температуру, плотность.

Плотность ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>) показывает какая масса продукта находится в одном кубическом метре его объема (формула (26)). Плотность большинства скоропортящихся продуктов составляет около 1000 кг/м<sup>3</sup>.

При замораживании плотность продукта уменьшается (на 5–8 %), так как вода в тканях, превратившись в лед, увеличивается в объеме

$$\rho = M/V \quad (26)$$

Удельной теплоемкостью ( $c$ , кДж/(кг·К)) является количество энергии (теплоты), которое необходимо подвести к 1кг вещества, чтобы изменить его температуру на один градус.

Если считать пищевые продукты двухкомпонентными смесями, содержащими  $W$  частей воды и  $(1 - W)$  частей сухих веществ с соответствующими удельными теплоемкостями, то удельная теплоемкость продукта  $c_0$  до начала льдообразования определяется по формуле (27)

$$c_0 = c_w W + c_c (1 - W), \quad (27)$$

где  $c_w$  – теплоемкость воды,  $c_w = 4,19$  кДж/(кг·К);  $c_c$  – теплоемкость сухих веществ,  $c_c = 0,71-1,36$  кДж/(кг·К) – для продуктов животного происхождения,  $c_c = 1,38-1,68$  кДж/(кг·К) – для продуктов растительного происхождения;  $W$  – содержание воды в продукте, кг/кг.

Поскольку при отрицательных температурах часть воды в продукте превращается в лед, то теплоемкость замороженного продукта определяется по формулам (28), (29).

$$c = c_{св}(1 - W) + c_{л}\omega W + c_{\omega}(1 - \omega)W,$$

$$c = c_{св}(1 - W) + c_{л}\omega W + c_{\omega}(1 - \omega)W, \quad (28)$$

$$\omega = 1 - \frac{t_{кр}}{t}, \quad (29)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);  $W$  – массовая доля воды (влагосодержание) продукта;  $\omega$  – массовая доля вымороженной воды;  $c_{св}$  – удельная теплоемкость сухих веществ, кДж/(кг·К);  $c_{л}$  – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К);  $c_{\omega}$  – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $t_{кр}$  – криоскопическая температура, °С;  $t$  – температура продукта, °С.

Чем больше влаги в продукте, тем выше теплоемкость. Изменение удельной теплоемкости продуктов в интервале температур замораживания определяется в основном начальным влагосодержанием продукта и количеством вымороженной воды. Теплоемкость убывает с понижением температуры, стремясь к нулю при абсолютном нуле температуры.

Удельная теплоемкость изменяется в довольно широких пределах в зависимости от вида продукта. При расчете холода, затрачиваемого на охлаждение, обычно принимают среднее значение удельной теплоемкости, которое рассчитывают или берут из соответствующих таблиц.

Теплопроводность – процесс передачи теплоты от одной частицы тела к другой или от одного тела к другому, когда эти тела соприкасаются друг с другом. Нагрев любого тела с одной стороны приводит к тому, что через некоторое время холодная часть тела начинает нагреваться. Молекулы нагретой части тела имеют скорость большую, чем молекулы холодной части. Перемещаются они на большее расстояние и при столкновении с молекулами холодной части тела передают им часть своей энергии. Увеличение энергии молекул холодной части тела приводит к повышению температуры. Теплопроводностью теплота может передаваться не только внутри однородного тела. Если два тела плотно соприкасаются друг с другом, то через контакт этих тел передается теплота. Теплопроводностью теплота может передаваться и через жидкие и газообразные тела.

Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ , Вт/(м·К)) – количество теплоты, которое проходит через единицу толщины однородного вещества за единицу времени при градиенте температуры в один градус:

В отличие от теплоемкости коэффициент теплопроводности не является аддитивной функцией, поскольку зависит не только от состава, но и от строения и направления теплового потока.

Для пищевого сырья, не подвергнутого тепловой обработке, т. е. имеющего температуру выше криоскопической, теплопроводность можно определить по формуле (30)

$$\lambda_0 = \lambda_{в}W + \lambda_{сух.в-в}(1 - W), \quad (30)$$

$\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды  $\lambda_B = 0,555$  Вт/(мК);  
 $\lambda_{\text{сух.в-в}}$  – коэффициент теплопроводности сух. в-в (для животного сырья 0,25 – 0,4 Вт/(м · К), для растительного сырья 0,22 – 0,26 Вт/(м · К);  
 $W$  – массовая доля воды (влажность) продукта;  $t_{\text{кр}}$  – криоскопическая температура, °С;  $t$  – температура продукта, °С.

С началом льдообразования теплопроводность увеличивается, так как коэффициент теплопроводности льда в четыре раза больше, чем воды (формула (31))

$$\lambda_M = 1,74W \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{кр}}}{t}\right) + 0,23. \quad (31)$$

В конкретных расчетах чаще используют формулу Эйкена (формула (32))

$$\lambda = \lambda_H \left(1 - \frac{3\omega(\lambda_H - \lambda)}{3\lambda_H - (1 - \omega) \cdot (\lambda_H - \lambda)}\right), \quad (32)$$

$\lambda_H$  – теплопроводность незамороженных продуктов Вт/(м · К);  
 $\lambda$  – теплопроводность замороженных продуктов Вт/(м · К).

Коэффициент температуропроводности ( $a$ , м<sup>2</sup>/с), характеризует скорость перемещения температурного фронта в теле продукта при тепловой или холодильной обработке (формула (33))

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (33)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности продукта, м<sup>2</sup>/с;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности продукта, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);  $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>.

При положительных температурах температуропроводность продукта практически неизменна, но с началом льдообразования она резко уменьшается. Это вызвано выделением теплоты кристаллизации. При дальнейшем понижении температуры вследствие роста теплопроводности и уменьшения теплоемкости температуропроводность увеличивается и достигает постоянного значения, когда вода полностью переходит в лед.

Энтальпия ( $i$ , кДж/кг) или теплосодержание. Она является функцией состояния термодинамической системы. Энтальпию продовольственных продуктов в холодильной технологии применяют для определения отведенной или подведенной теплоты при холодильной обработке продуктов (формула (34)).

$$q = i_1 - i_2 = c(t_1 - t_2) \quad (34)$$

$i_1, i_2$  – энтальпия в начале и конце холодильной обработки продукта, кДж/кг;  
 $c$  – средняя удельная теплоемкость в интервале температур  $t_1, t_2$ , кДж/кг·К.

Криоскопической температурой ( $t_{кр}$ , °C) является температура, при которой начинается кристаллообразование в продукте. В большинстве продуктов криоскопическая температура  $t_{кр} = -0,5 - -5^{\circ}\text{C}$ . Более низкое значение температуры соответствует продуктам с меньшим содержанием воды.

В пищевых продуктах образование льда начинается при температурах ниже температуры замерзания их растворов ( $t_{кр}$ ), величины которых для одного вида продукта меняются в широких пределах.

Количество вымороженной воды ( $\omega$ ) представляют, как долю от общей ее массы в продукте. Так как в воде пищевых продуктов растворены различные минеральные и органические вещества, то понижение температуры при определенных условиях сопровождается изменением концентрации раствора (формула (29)).

Процесс льдообразования в пищевых продуктах с понижением температуры можно представить, как плавный непрерывный процесс повышения концентрации остаточного незамороженного раствора и понижения его температуры замерзания.

Полное превращение тканевой влаги в лед из-за трудностей вымораживания адсорбционно-связанной воды происходит при криогидратной (эвтектической) температуре в интервале минус 55 – минус 65 °C. В настоящее время имеются данные, что жидкая фаза сохраняется при минус 68 °C и полностью вымораживается только при минус 70 °C.

Вода в лед полностью не превращается даже при эвтектической температуре. Объясняется это присутствием в гидробионтах связанной воды, отличающейся по свойствам от чистой воды. Если не считать небольшого количества воды, удерживаемой механически, то вся вода в пищевых продуктах является связанной.

Прочно связанная вода характеризуется большой теплотой испарения и не замерзает даже при низких температурах, так как энергия ее связи составляет от 80 до 155 кДж/кг. Так, при температуре минус 100 °C и ниже в пищевых продуктах не замерзает от 5 до 13 % воды. Это обстоятельство не учитывается в расчетных формулах, полученных на основании закона Рауля.

Поэтому опытные и расчетные значения  $\omega$  различаются на 7–10 %, причем наибольшее различие приходится на область низких температур, поскольку прочно связанная вода составляет основную долю всей невымороженной воды (формула (35))

$$\omega = \left(1 - b \frac{1 - W_H}{W_H}\right) \left(1 - \frac{t_{кр}}{t}\right), \quad (35)$$

где  $b$  – содержание прочно связанной воды на единицу массы сухого вещества, кг/кг;  $W_H$  – начальное содержание влаги в продукте, доли единицы.



## Примеры решения задач

### Задача 1

Рассчитать значение доли вымороженной воды в толще говядины при  $t = -5; -10; -15; -20$  °С;  $t_{кр} = -0,8$  °С. Произвести расчет также для случаев, когда вся вода считается свободной к вымораживанию и когда 12 % воды считается связанной.

Решение:

$$1) \omega(-5^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-0,8}{-5} = 0,84; \quad \omega(-10^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-0,8}{-10} = 0,92;$$

$$\omega(-15^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-0,8}{-15} = 0,95; \quad \omega(-20^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-0,8}{-20} = 0,96;$$

2) поскольку 12 % влаги не вымерзает, то соответственно находим коэффициент

$$1 - \frac{12\%}{100\%} = 0,88$$

$$\omega(-5^\circ\text{C}) = 0,84 \cdot 0,88 = 0,74; \quad \omega(-10^\circ\text{C}) = 0,92 \cdot 0,88 = 0,81;$$

$$\omega(-15^\circ\text{C}) = 0,95 \cdot 0,88 = 0,83; \quad \omega(-20^\circ\text{C}) = 0,96 \cdot 0,88 = 0,84.$$

Ответ: доли вымороженной воды ( $\omega$ ) = 0,92; 0,96; 0,81; 0,84.

### Задача 2

Замораживается филе морского окуня от  $t_{нач.} = 20$  °С, до  $t_{кон.} = -18$  °С. Рассчитать количество теплоты, которая необходима для 1 кг продукта  $t_{кр} = -2$  °С;  $W = 0,8$ ;  $C_n = 3500$  Дж/кгК;  $C_{зам.} = 1800$  Дж/кгК.

1. Теплота, отводимая от незамороженного филе

$$Q_1 = C_n(t_n - t_{кр}) = 3500 \cdot (20 - (-2)) = 77 \text{ кДж/кг}.$$

2. Теплота, отводимая от замороженной части

$$Q_2 = C_{зам.}(t_{кр} - t_{кон.}) = 1800 \cdot (-2 - (-18)) = 29 \text{ кДж/кг}.$$

Ответ:  $Q = 77$  кДж/кг; 29 кДж/кг.

### Задача 3

Рассчитать коэффициент теплопроводности мяса трески по формуле Эйкена при  $t = -30; -20; -10; -5$  °С;  $t_{кр} = -1$  °С;  $\lambda_n = 0,55$  Вт/м·К;  $\lambda = 1,85$  Вт/м·К.

Решение:

Находим долю вымороженной воды

$$\omega(-5^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-1}{-5} = 0,8; \quad \omega(-10^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-1}{-10} = 0,9;$$

$$\omega(-20^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-1}{-20} = 0,95; \quad \omega(-30^\circ\text{C}) = 1 - \frac{-1}{-30} = 0,97;$$

$$\lambda(-5^\circ\text{C}) = 0,55 \left( 1 - \frac{3 \cdot 0,8(0,55 - 1,85)}{3 \cdot 0,55 - (1 - 0,8) \cdot (0,55 - 1,85)} \right) = 1,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda(-10^{\circ}\text{C}) = 0,55 \left( 1 - \frac{3 \cdot 0,9(0,55-1,85)}{3 \cdot 0,55 - (1-0,9) \cdot (0,55-1,85)} \right) = 1,63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda(-20^{\circ}\text{C}) = 0,55 \left( 1 - \frac{3 \cdot 0,95(0,55-1,85)}{3 \cdot 0,55 - (1-0,95) \cdot (0,55-1,85)} \right) = 1,74 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda(-30^{\circ}\text{C}) = 0,55 \left( 1 - \frac{3 \cdot 0,97(0,55-1,85)}{3 \cdot 0,55 - (1-0,97) \cdot (0,55-1,85)} \right) = 1,88 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Ответ:  $\omega = 0,8; 0,9; 0,95; 0,97$

$\lambda = 1,45 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}; 1,63 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}; 1,74 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}; 1,88 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}.$

### Варианты задач

1. Рассчитать удельную теплоемкость и коэффициент температуропроводности для говядины при  $t = 4^{\circ}\text{C}$ ,  $t = -20^{\circ}\text{C}$ . Говядина 1-й категории, сырая;  $W = 0,745 \text{ кг}/\text{кг}$ ;  $t_{\text{кр}} = 272 \text{ К}$ ;  $\rho = 1077 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

2. Определить количество отводимой теплоты при охлаждении 100 кг хека серебристого, начальная температура рыбы  $20^{\circ}\text{C}$ , конечная  $0^{\circ}\text{C}$ , используя значения энтальпий.

3. Рассчитайте количество вымороженной воды в треске при температурах:  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ . Постройте график зависимости  $\omega = f(t)$ .

4. Рассчитайте количество вымороженной воды в пикше при температурах:  $-1^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ . Расчеты провести с учетом и без прочно связанной воды. Результаты сравнить, сделать выводы.

### Отчет о проделанной работе должен содержать:

- цель работы;
- решение задач.

### Контрольные вопросы

1. Основные теплофизические характеристики пищевых продуктов.
2. Как изменяются теплофизические характеристики пищевых продуктов при понижении температуры?
3. Вода, особенности её состояния в пищевых продуктах при понижении температуры.
4. Понятие о криоскопической температуре.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

### РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ

*Цель занятия:* приобретение умений по расчету продолжительности охлаждения сырья, полуфабрикатов и кулинарной продукции.

#### Ход работы

**Задание 1.** Провести решение задач по расчетам расхода холода и продолжительности охлаждения в соответствии с вариантами заданий, указанными преподавателями (табл. 7).

#### Теоретическая часть

Охлаждение – это процесс быстрого понижения температуры продукта от начальной до конечной. При производстве и хранении охлажденной продукции ее температура становится близкой к криоскопической точке тканевого сока, но не должна быть ниже последней. Это физический способ консервирования, основанный на принципе анабиоза (психроанабиоз).

При охлаждении происходит передача теплоты (энергии) от одного тела к другому. Для передачи теплоты от одного тела к другому обязательным условием является разность температур тел, причем теплота передается от тела с более высокой температурой к телу с более низкой. Тело с более высокой температурой получило название источника теплоты, а тело с более низкой температурой – приемника теплоты (теплоприемника).

Передача теплоты может осуществляться тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. В расчетах по холодильной технологии пищевых продуктов часто используется понятие теплопроводности.

Скорость охлаждения максимальна при использовании циркулирующих жидких сред и минимальна при охлаждении в воздухе. Промежуточное значение занимает способ охлаждения льдом.

Количество тепла  $Q_0$  (в кДж), выделенное продуктом при его охлаждении от начальной температуры  $t_n$  до конечной среднеобъемной температуры охлаждения  $t_v$ , упрощенно определяют по формуле (36) или (37)

$$Q_0 = G c_0 (t_n - t_v), \quad (36)$$

$$Q_0 = G c_0 (t_n - t_c) (1 - \theta_v), \quad (37)$$

где  $Q_0$  – расход холода на охлаждение продукта, кДж;  $G$  – масса охлаждаемого продукта, кг;  $c_0$  – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);  $t_n - t_v = \Delta t$  – соответственно разница между начальной  $t_n$  и конечной среднеобъемной  $t_v$  температурой продукта, °С;  $t_c$  – температура охлаждающей среды, °С;  $\theta_v$  – безразмерная среднеобъемная температура.

В процессе охлаждения скорость понижения температуры продукта – величина переменная, уменьшающаяся по мере снижения температуры объекта. В связи с этим количество тепла, выделяемое продуктом, будет максимальным в начале процесса и минимальным в конце; соответственно изменяется и тепловая нагрузка на охлаждающие устройства (или количество тепла, воспринимаемое приборами охлаждения).

Продукт охлаждается в результате отдачи теплоты в окружающую среду. Количество тепла, выделяемое 1 кг продукта при его охлаждении в любом заданном интервале температур  $q_0$  (кДж/кг), легко определяется также по разности энтальпий (формула 38).

$$q_0 = i_n - i_v. \quad (38)$$

Общее же количество тепла  $Q_0$  (в кДж) при охлаждении  $G$  кг продукта определяется по формуле (39)

$$Q_0 = Gq_0. \quad (39)$$

В приведенных формулах  $i_n$  – энтальпия продукта при  $t_n$ , кДж/кг;  $i_v$  – энтальпия продукта при  $t_v$  или какой-либо иной промежуточной температуре, кДж/кг;  $q_0$  – количество тепла, выделяемое 1 кг продукта при охлаждении от  $t_n$  до  $t_v$ , кДж/кг.

Значения энтальпии берут из соответствующих таблиц справочников физических характеристик пищевых продуктов.

Среднеобъемной температурой тела, температурное поле которого непостоянно, называется температура, которая может быть достигнута, если объект поместить в адиабатные условия (формула (40))

$$t_v = t_z - \Psi(t_z - t_p), \quad (40)$$

где  $t_v$  – среднеобъемная температура, °С;  $t_z$  – конечная температура в центре продукта, °С;  $t_p$  – конечная температура на поверхности продукта, °С;  $\Psi$  – коэффициент, определяемый формой тела: при охлаждении в воздухе  $\Psi$  для пластины равен 1/3, цилиндра – 1/2, шара – 3/5; при охлаждении в жидкости  $\Psi$  для пластины равен 1/4, цилиндра – 2/5, шара – 1/2.

При линейном распределении температур среднеобъемная температура пластины приближенно может быть найдена как средняя арифметическая температура поверхности и центра продукта (формула (41))

$$t_v = \frac{(t_c + t_p)}{2}, \quad (41)$$

Знание среднеобъемной температуры продукта важно с практической точки зрения. Например, когда продукт после охлаждения направляют в камеру холодильного хранения, то это не должно вызывать повышения или понижения

температуры в камере. Поэтому обязательным условием является соответствие среднеобъемной температуры продукта температуре воздуха в камере хранения.

Продолжительность охлаждения продуктов зависит от их свойств, свойств охлаждающей среды и условий, при которых протекает процесс (толщина продукта, его ТФХ, плотность, температура и вид охлаждающей среды, скорость и характер движения среды, коэффициент теплоотдачи от продукта к охлаждающей среде).

Для расчета продолжительности охлаждения продукта необходимо точное выражение упомянутой выше сложной зависимости – знание количественных выражений постоянных и переменных показателей продукта и охлаждающей среды. В связи с этим расчет продолжительности охлаждения продукта труден и сложен, а на практике продолжительность охлаждения определяют на основе опытных данных.

Для приблизительного расчета продолжительности охлаждения условно несколько упрощают процесс, в действительности состоящий из ряда разнообразных физических явлений. Так, например, отвод тепла при охлаждении рассматривается в условиях постоянных ТФХ объекта, постоянной температуры теплоотводящей среды и постоянного коэффициента теплоотдачи на поверхности тела, а также отсутствия внешнего и внутреннего источников тепла.

Относительно простое и вместе с тем удобное для практических целей решение задачи, даёт формула А. Фикина. Это решение используется для приближенной оценки длительности охлаждения (формула (42))

$$\tau_0 = \frac{FR^2}{a_0} \left[ \left( \frac{2,3}{Bi_0} + 0,8 \right) \lg \frac{t_n - t_c}{t_z - t_c} + 0,12 \right], c, \quad (42)$$

где  $F$  – коэффициент, учитывающий форму продукта (для тела в форме пластины  $F = 1$ , для цилиндра  $F = 1/2$ , для шара  $F = 1/3$ );  $R$  – определяющий геометрический размер тела, м (половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара);  $a$  – коэффициент температуропроводности продукта,  $m^2/c$ ;  $t_c$  – температура охлаждающей среды,  $^{\circ}C$ ;  $t_n$  и  $t_z$  – соответственно начальная и конечная температура центра охлаждаемого продукта,  $^{\circ}C$ ;  $Bi_0$  – критерий Био, определяемый по формуле (43)

$$Bi_0 = \frac{\alpha R}{\lambda_0}, \quad (43)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от продукта к среде,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda_0$  – теплопроводность продукта,  $Вт/(m \cdot K)$ . При решении задачи следует обратить внимание на  $\alpha$   $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;  $R$ , м;  $t_c$ ,  $^{\circ}C$  – параметры, определяющие интенсивность охлаждения продуктов, поскольку интенсивность процесса охлаждения влияет на длительность последующего холодильного хранения.

Решение задачи упрощается, если для решения используются номограммы для тел стандартной стереометрической формы (см. рис. приложения В). В методическом указании представлены номограммы для тел, форма которых

подобна пластине и шару. На практике наиболее часто требуется оценить длительность охлаждения продукта в его центре.

При оценке длительности охлаждения на основе номограмм, решение задачи сводится к последовательному определению величин:

– безразмерной температуры  $\theta$  или  $(1 - \theta)$  в зависимости от используемого графика) по формуле (44) (точка А на рис. 8)

$$\theta_{(v,p,z)} = \frac{t_{(v,p,z)} - t_c}{t_n - t_c}, \quad (44)$$

где  $t_{(v, p, z)}$  – конечная температура процесса, которая может быть соответственно среднеобъемной, температурой поверхности и температурой центра, °С;

– кривой, соответствующей величине критерия Био. Пересечение горизонтальной линии из точки А с кривой  $Bi$  даёт точку В;

– перпендикуляр на линию, соответствующую критерию Фурье (формула (45)) приводит к точке С

$$F_o = \frac{a_0 \tau_0}{R^2}, \quad (45)$$

где  $\tau_0$  – продолжительность охлаждения.

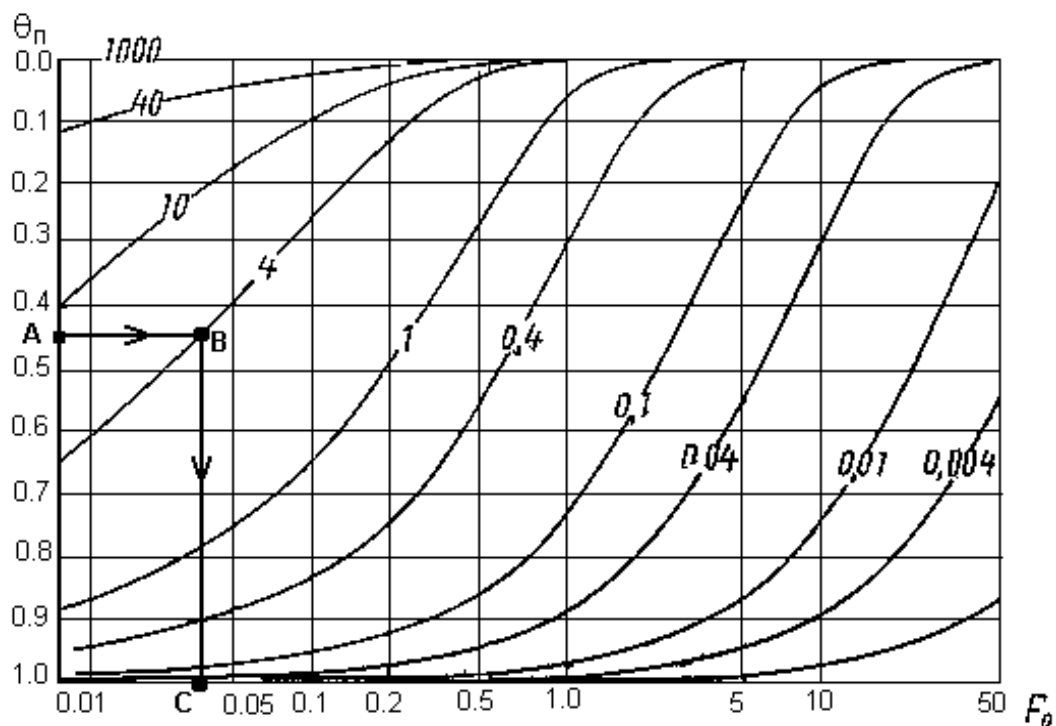


Рисунок 8 – Порядок пользования номограммой

Из величины числа Фурье ( $F_o$ ) определяется длительность охлаждения продукта.

## Примеры решения задач

### Задача 1

Определить количество теплоты, которая будет отведена при охлаждении 50 кг морского окуня при температуре от 20 до 0 °С.

Решение:

В соответствии с формулой (66) количество отводимого тепла будет равно

$$Q = 50 \cdot 3,38 \cdot 20 = 3,38 \cdot 10^3 \text{ кДж.}$$

Ответ:  $3,38 \cdot 10^3$  кДж.

### Задача 2

В холодильной камере охлаждается пастила размером 2,0 x 2,0 x 0,2 м, от начальной температуры  $t_n = 50$  °С. Температура воздуха в камере  $t_c = 0$  °С, коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Содержание влаги в продукте  $W = 60,0$  %, плотность  $\rho = 580$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda_0 = 0,50$  Вт/(м·К). Определите теплофизические свойства продукта: теплоемкость, коэффициент температуропроводности.

Найти длительность охлаждения пастилы и количество отведенной теплоты до получения температуры ее средней плоскости, равной  $t_z(x/R=0) = 20$  °С. Какая при этом будет температура наружных поверхностей и среднеобъемная температура? При расчете охлаждение считать двусторонним симметричным. Массу продукта при расчетах принять 10 кг.

Задачу решить двумя способами.

Решение:

1. Поскольку толщина пастилы на порядок меньше двух других размеров, по форме ее можно считать близкой к плоской безграничной пластине. Характерным размером пластины при симметричном охлаждении является половина толщины  $R = \delta/2 = 0,1$  м.

Определим теплофизические свойства:

$$\lambda_0 = 0,50 \text{ Вт/(м·К); } \rho = 580 \text{ кг/м}^3;$$
$$c_0 = c_w W + c_c(1 - W) = 4,19 * 0,60 + 1,42 * (1 - 0,60) = 3,08 \text{ кДж/(кг·К)}$$
$$a_0 = \frac{\lambda_0}{c_0 \rho} = \frac{0,50}{3,08 * 10^3 * 580} = 2,8 * 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Вычисляем критерии Био:

$$Bi_0 = \frac{\alpha * R}{\lambda_0} = \frac{15 * 0,1}{0,50} = 3.$$

Определяем безразмерную температуру:

$$\theta_z = \frac{t_z - t_c}{t_n - t_c} = \frac{20 - 0}{50 - 0} = 0,4.$$

$$\theta_z = \theta_0.$$

Следовательно,  $(1 - \theta_0) = 0,6$ .

При использовании номограммы для центра пластины по известным  $(1 - \theta_0)$  и  $Bi$  определяем критерий Фурье:

$$Fo = 0,8.$$

Следовательно, продолжительность охлаждения:

$$\tau_0 = \frac{Fo * R^2}{a_0} = \frac{0,8 * 0,1^2}{2,8 * 10^{-7}} = 28570 \text{ с} = 7,9 \text{ ч.}$$

По номограмме для поверхности пластины, зная критерии  $Bi$  и  $Fo$  находим  $(1 - \theta_{ст})$ .

$$(1 - \theta_{ст}) = (1 - \theta_p) = 0,96.$$

Следовательно,  $\theta_p = 1 - 0,96 = 0,04$ .

Выводим  $t_p$  из формулы (14) для безразмерной температуры

$$t_p = \theta_p(t_n - t_c) + t_c,$$

$$t_p = 0,04 * (50 - 0) + 0 = 2^\circ\text{C}.$$

Поскольку у нас безграничная пластина, воспользуемся формулой для определения среднеобъемной температуры

$$t_v = \frac{(t_z + t_p)}{2} = \frac{20 + 2}{2} = 11^\circ\text{C}.$$

Кроме того, определим среднеобъемную температуру по соответствующей номограмме (Приложение В), используя критерии  $Bi$  и  $Fo$ .

Находим

$$(1 - \theta_{ср}) = (1 - \theta_v) = 0,7.$$

Следовательно,  $\theta_v = 1 - 0,7 = 0,3$ .

Выводим искомую среднюю по объему температуру  $t_v$  из формулы для безразмерной температуры

$$t_v = \theta_v(t_n - t_c) + t_c,$$

$$t_v = 0,3(50 - 0) + 0 = 15^\circ\text{C}.$$

Количество теплоты, отведенной от плиты к моменту времени  $\tau_0$ , подсчитываем по формулам (6) и (7)

$$Q_0 = 10 * 3,08 * (50 - 11) = 1201,2 \text{ кДж},$$

$$Q_0 = 10 * 3,08 * (50 - 15) = 1078 \text{ кДж},$$

$$Q_0 = 10 * 3,08 * (50 - 0) * (1 - 0,3) = 1078 \text{ кДж}.$$

Продолжительность охлаждения можно определить с использованием эмпирической формулы А. Фикина (12). Это решение используется для приближенной оценки длительности охлаждения.

$$\tau_0 = \frac{1 * 0,1^2}{2,8 * 10^{-7}} \left[ \left( \frac{2,3}{3} + 0,8 \right) \lg \frac{50 - 0}{20 - 0} + 0,12 \right] = 26551,4 \text{ с} = 7,4 \text{ ч}.$$

Ответ: теплоемкость пастилы  $3,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , температуропроводность  $2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , температура поверхности  $2^\circ\text{C}$ , среднеобъемная температура  $11$  и  $15^\circ\text{C}$ , продолжительность охлаждения  $7,9$  и  $7,4$  ч, количество отведенной теплоты от  $10 \text{ кг}$  пастилы  $1201,2$  и  $1078 \text{ кДж}$ .

Таблица 7 – Варианты заданий



Номер варианта	Условия задачи
1	30 кг мяса говядины охлаждается от 15 до 0 °С. Какое количество теплоты для этого необходимо отвести?
2	Определить продолжительность охлаждения полуфабриката (тушки судака) толщиной 8 см, при следующих параметрах: $t_n=16^{\circ}\text{C}$ , $t_k=1^{\circ}\text{C}$ , $W=80\%$ , $\rho=1060\text{кг/м}^3$ , охлаждающая среда циркулирующий воздух, $t_b=-2^{\circ}\text{C}$ , $\alpha=40\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$
3	Определить продолжительность охлаждения полуфабриката (цыпленка бройлера) $R=5.5$ см, при следующих параметрах: $t_n=25^{\circ}\text{C}$ , $t_k=5^{\circ}\text{C}$ , $W=78\%$ , $\rho=1180\text{кг/м}^3$ , охлаждающая среда циркулирующий воздух, $t_b=-2^{\circ}\text{C}$ , $\alpha=29\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$
4	Определить температуру на поверхности продукта, которая будет достигнута при его охлаждении: филе цыпленка бройлера $l=7\text{см}$ , $t_n=20^{\circ}\text{C}$ , $t_k=4^{\circ}\text{C}$ , $W=78\%$ , $\rho=1070\text{кг/м}^3$ , охлаждающая среда циркулирующий воздух, $t_b=-2^{\circ}\text{C}$ , $\alpha=29\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , $\tau=45$ мин

**Отчет о проделанной работе должен содержать:**

- цель работы;
- решение задач.

**Контрольные вопросы**

1. Какой должна быть температура охлажденного продукта?
2. От чего зависит криоскопическая температура?
3. Как изменяются теплофизические характеристики при охлаждении?
4. От чего зависит интенсивность охлаждения продукта?
5. Что характеризует критерий Био?
6. Какими способами можно рассчитать продолжительность охлаждения?
7. Какие данные необходимы для расчета продолжительности охлаждения?
8. Почему важно знать среднеобъемную температуру продукта?
9. Как пользоваться номограммами?
10. На чем основан расчет количества теплоты, которую необходимо отвести от продукта при охлаждении?

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5  
РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ  
И ДЕФРОСТАЦИИ ПРОДУКТОВ**

**Цель занятия:** приобретение умений по расчету продолжительности замораживания, дефростации сырья, полуфабрикатов и кулинарной продукции.

### **Ход работы**

**Задание 1.** Провести решение задач по расчетам расхода холода и продолжительности замораживания, дефростации пищевых продуктов в соответствии с вариантами заданий, указанными преподавателями (табл. 8).

### **Теоретическая часть**

Замораживание – консервирование сырья при температурах, значительно ниже криоскопических температур тканевого сока, когда большая часть воды, содержащейся в биологическом объекте, превращается в лед. При замораживании водного сырья применяют температуру минус 18 °С – минус 25 °С.

Криоскопической температурой  $t_{кр}$  принято считать температуру начала выпадения твердой фазы (кристаллов) из тканевой жидкости продукта. Значения криоскопической температуры различны для каждого вида продуктов. Для технических расчетов криоскопическую температуру часто принимают равной минус 1 °С.

В холодильной технологии воду, превратившуюся в лед, называют вымороженной. Количество вымороженной воды в продукте – это количество льда, отнесенное к начальному содержанию воды, являющееся функцией температуры. Приблизительно оно может быть определено по формуле (29), (35).

В области положительных температур теплофизические характеристики сырья меняются незначительно, и их принимают постоянными. Когда температура становится ниже криоскопической, теплофизические характеристики продукта существенно изменяются вследствие льдообразования и различия свойств воды и льда, а также тепловых эффектов, сопровождающих этот процесс.

Для расчета среднеобъемной температуры продукта, когда температура его термического центра меньше минус 5 °С удобно пользоваться формулой (46)

$$t_v = t_z - \Psi \frac{Bi_m}{Bi_m + n} (t_z - t_c), \quad (46)$$

где  $n$  – коэффициент, зависящий от метода охлаждения: при воздушном охлаждении  $n=2$ , при охлаждении в жидкости  $n=3$ ;  $Bi_m$  – критерий Био для замороженного продукта (формула (47)):

$$Bi_m = \frac{\alpha R}{\lambda_m}. \quad (47)$$

### **Способы определения количества холода, отводимого в процессе замораживания, и продолжительности замораживания**

Теплота, отводимая от продукта при замораживании, складывается из теплоты охлаждения продукта от начальной температуры до криоскопической, теплоты льдообразования, теплоты, отводимой при понижении температуры от

криоскопической до средней конечной температуры мороженого продукта и определяется по формуле (48)

$$Q_m = G[c_0(t_n - t_{кр}) + W\omega r_a + c_m(t_{кр} - t_v)], \quad (48)$$

где  $Q$  – теплота, отводимая при замораживании, кДж;  $G$  – масса продукта, кг;  $c_0$  и  $c_m$  – удельная теплоемкость при температуре соответственно выше криоскопической и среднеобъемной конечной, кДж/(кг·К);  $t_n$  и  $t_{кр}$  – начальная и криоскопическая температуры, °С;  $t_v$  – среднеобъемная конечная температура мороженой продукции, °С;  $W$  – содержание воды в продукте, кг/кг;  $\omega$  – количество вымороженной воды при  $t_v$  кг/кг воды;  $r_a$  – удельная теплота льдообразования,  $r_a = 335,2$  кДж/кг.

Известна и более простая формула (49) вычисления теплоты, отводимой от продукта при замораживании.

$$Q_m = G(i_n - i_v), \quad (49)$$

где  $(i_n - i_v)$  – разность удельных энтальпий при среднеобъемных начальной и конечной температурах, кДж/кг.

Продолжительность процесса замораживания  $\tau_m$  – время, необходимое для охлаждения тела от начальной до заданной температуры с учетом превращения в лед воды, содержащейся в тканях. Продолжительность замораживания зависит от многих факторов и обычно ее определяют экспериментальным путем, однако известно также несколько расчетных способов нахождения  $\tau_m$ , из которых в холодильной технологии широко распространены формула Р. Планка и формула Д.Г. Рютова.

Формула Р. Планка для расчета продолжительности замораживания имеет следующий вид (50):

$$\tau_m = \frac{q\rho}{t_{кр}-t_c} F \frac{\delta}{2} \left( \frac{\delta}{4\lambda_m} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (50)$$

где  $\delta$  – толщина пластины, диаметр цилиндра или шара, м;  $F$  – коэффициент формы,  $K_f = V/SL$  (1, 1/2, 1/3);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение Р. Планка дает лишь приближенное значение  $\tau_m$ , хотя как фундаментальная формула она включена в рекомендации Международного института холода.

Из многочисленных попыток усовершенствовать формулу Р. Планка следует отметить получившую наиболее широкое распространение формулу Д. Г. Рютова (51):

$$\tau_m = \frac{\rho}{\lambda_m} F \left[ \frac{q(1+0,0053t_n)}{8(t_{кр}-t_c)} + \frac{nc_m}{\pi^2} \left( \ln \frac{t_{кр}-t_c}{t_z-t_c} - 0,21 \right) \right] \delta \left( \delta + \frac{4\lambda_m}{\alpha} \right), \quad (51)$$

где  $\delta$  – толщина пластины, диаметр цилиндра или шара, м;  $F$  – коэффициент формы;  $t_n$  – начальная температура тела рыбы, °С;  $t_z$  – конечная температура в центре продукта, °С;  $c_m$  – теплоемкость замороженного продукта, кДж/(кг · К);  $n$  – поправочный коэффициент, зависящий от скорости замораживания (1,03 – при быстром замораживании (рассол), 1,16 – при медленном (воздух)).

Размораживание – завершающая стадия низкотемпературной обработки продуктов. Это тепловой процесс, при котором определенное количество теплоты передается продукту для повышения его температуры от начальной (минус 18 – минус 25 °С) до минус 1 °С. В соответствии с современными представлениями размораживание рассматривается как процесс, обратный замораживанию. Он состоит в таянии кристаллов льда и восстановлении первоначальной гистологической структуры тканей.

Количество теплоты, необходимой от продукта до полного его размораживания, определяют по формуле (52)

$$Q_p = G [c_m(t_{кр} - t_n) + W\omega r_a + c_0(t_k - t_{кр})] = G(i_k - i_n), \quad (52)$$

где  $Q_p$  – количество теплоты, подводимой к продукту при размораживании, Дж;  $G$  – масса продукта, кг;  $(i_k - i_n)$  – разность удельных энтальпий при конечной  $t_k$  и начальной  $t_n$  температурах, кДж/кг;  $c_m$  и  $c_0$  – теплоемкость мороженого и размороженного продукта, кДж/(кг·К);  $t_{кр}$  – криоскопическая температура, °С;  $W$  – содержание влаги в продукте, доли единицы;  $\omega$  – количество вымороженной влаги, доли единицы;  $r_a$  – теплота льдообразования, кДж/кг,  $r_a = 335,2$  кДж/кг.

### Способы определения продолжительности размораживания

Процесс размораживания протекает в соответствии с обратной кривой замораживания: температура продукта вначале возрастает до точки таяния льда, затем остается постоянной и в конце процесса повышается до требуемой.

При определении продолжительности размораживания предполагается, что отсутствуют тепловыделения в области продукта лежащей глубже границы раздела, а все тепло, выделяемое при движении границы раздела, отводится к внешней среде через замороженный слой, теплоемкость которого равна 0.

Э. Альмаши предложил вычислять продолжительность размораживания по двум стадиям: продолжительность первой стадии (от  $t_n$  до  $t_{кр}$ ) рассчитывается на основании уравнения теплопроводности для условий простого нагревания по типу формулы А. Фикина для охлаждения, второй (от  $t_{кр}$  до  $t_k$ ) – по методу элементарных тепловых балансов.

Г. Д. Кончаков согласившись с расчетом продолжительности первой стадии процесса размораживания, предложил продолжительность второй стадии

рассчитывать, исходя из скорости продвижения границы раздела. Он получил формулу для расчета продолжительности второй стадии размораживания равнозначную формуле Р. Планка.

Г. Б. Чижовым было предложено продолжительность первой стадии размораживания принять равной 30 % от продолжительности второй стадии. Таким образом, в окончательном виде формула для расчета продолжительности размораживания имеет следующий вид (53):

$$\tau_p = \frac{q_p \rho F R}{t_c - t_{кр}} * \left( \frac{R}{2\lambda_0} + \frac{1}{\alpha} \right) * m, \quad (53)$$

где  $q_p$  – количество теплоты, подведенной к единице продукта, кДж/кг;  $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – коэффициент формы, для пластины 1, для цилиндра 1/2, для шара 1/3;  $R$  – полутолщина (радиус) продукта, м;  $t_c$  – температура среды, °С;  $t_{кр}$  – криоскопическая температура продукта, °С;  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности размороженного слоя продукта, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от продукта к среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $m$  – множитель, учитывающий продолжительность первой стадии,  $m = 1,3$ .

В этой формуле вместо разности температур ( $t_c - t_{кр}$ ) можно брать разность ( $t_k - t_n$ ), где  $t_k$  – конечная температура размораживаемого продукта, °С;  $t_n$  – начальная температура размораживаемого продукта, °С.

Продолжительность размораживания продуктов можно оценить и по другой, более современной и точно формуле (54)

$$\tau_p = \frac{q_m \rho R}{t_c - t_{кр}} * \frac{Bi}{2\alpha} \left( 1 + \frac{2c_0}{\mu_1^2 q_m} (t_c - t_{кр}) \right), c \quad (54)$$

где  $q_m = W \omega r_a$ , кДж/кг;  $\mu_1$  – корень характеристического уравнения для тела заданной формы, определяемый исходя из величины критерия Био (см. приложение Б, табл. П.Б.4) [6].

## Примеры решения задач

### Задача 1

Блок рыбного фарша толщиной 46 мм замораживается в камере, температура воздуха в которой минус 35 °С, коэффициент теплоотдачи 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Начальная температура продукта 15 °С, содержание влаги 77 %,  $\lambda_0 = 0,47$  Вт/(м·К).

Определить теплофизические свойства мороженого продукта:  $c_m$ ,  $\lambda_m$  и  $a_m$ .

Найти количество отведенной теплоты  $q_m$  и  $Q_m$  до получения среднеобъемной температуры  $t_v$ , температуру наружных поверхностей  $t_p$  и центра  $t_z$  при заданной среднеобъемной температуре, продолжительность замораживания по формуле Р. Планка и по формуле Д. Г. Рютова.

Массу продукта при расчетах принять 10 кг.

Решение:

Теплофизические свойства мороженого продукта:

– количество вымороженной влаги

$$\omega = \left(1 - \frac{0,27(1-0,77)}{0,77}\right) * \left(1 - \frac{(-1)}{(-18)}\right) = 0,87 ;$$

– теплоемкость  $c_m$

$$c_m = 4,19 * 0,77(1 - 0,87) + 2,1 * 0,77 * 0,87 + 1,46(1 - 0,77) \\ = 2,16 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К})$$

или

$$c_0 = 4,19 * 0,77 + 1,46 * (1 - 0,77) = 3,56 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К});$$

$$c_m = 3,56 - 2,1 * 0,77 * 0,87 = 2,16 \text{ кДж}/(\text{кг} * \text{К});$$

– коэффициент теплопроводности  $\lambda_m$

$$\lambda_m = 0,47 + 0,87 * 1,05 = 1,38 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К});$$

– температуропроводности  $a_m$

$$a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \rho} = \frac{1,38}{2,16 * 10^3 * 1020} = 6,28 * 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

Количество отведенной теплоты  $q$  и  $Q$  до получения среднеобъемной температуры минус  $18^\circ\text{C}$

$$q_m = c_0(t_n - t_{кр}) + W\omega r_a + c_m(t_{кр} - t_v),$$

$$q_m = 3,56(15 - (-1)) + 0,77 * 0,87 * 335,2 + 2,16((-1) - (-18)) \\ = 318,23 \text{ кДж}/\text{кг}$$

или приближенно

$$q_m = (i_n - i_v) = 318,5 - 5,0 = 313,5 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$G = 10 \text{ кг},$

$Q_m = 10 q_m = 3182,3 \text{ кДж}$

или приближенно

$$Q_m = G(i_n - i_v) = 10 * 313,5 = 3135 \text{ кДж}.$$

Температуру наружных поверхностей  $t_p$  и центра  $t_z$  при заданной среднеобъемной температуре определяем по формуле (22). Для этого сначала определяем значение критерия Био по формуле (23)

$$Bi_m = \frac{50 * 0,023}{1,38} = 0,83,$$

$$(-18) = t_z - \frac{1}{3} * \frac{0,83}{0,83 + 2} (t_z - (-35)) = t_z - 0,10(t_z + 35),$$

$t_z = -16,11^\circ\text{C}.$

Исходя из формулы (10) определяем  $t_p$

$$t_p = 3 \left( t_v - \frac{2}{3} t_z \right) = 3 \left( (-18) - \frac{2}{3} (-16,11) \right) = -21,78^\circ\text{C}$$

или приближенно по формуле (11)

$$t_p = 2t_v - t_z = 2 * (-18) - (-16,11) = -19,89^\circ\text{C}.$$

Продолжительность замораживания по формуле Р. Планка (26)

$$\tau_m = \frac{318,23 * 10^3 * 1020}{-1 - (-35)} * \frac{1}{2} \left( \frac{0,046}{4 * 1,38} + \frac{1}{50} \right) = 6221,4 \text{ с} = 1,7 \text{ ч},$$

по формуле Д.Г. Рютова (27)

$$\tau_m = \frac{1020}{1,38} \cdot 1 \left[ \frac{318,23 \cdot 10^3 (1 + 0,0053 \cdot 15)}{8(-1 - (-35))} + \frac{1,113 \cdot 2160}{3,14^2} \left( \ln \frac{-1 - (-35)}{-16,11 - (-35)} - 0,21 \right) \right] \\ * 0,046 * \left( 0,046 + \frac{4 * 1,38}{50} \right) = 7205,3 \text{ с} = 2,0 \text{ ч.}$$

Ответ: теплоемкость блока рыбного фарша мороженого 2,16 кДж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 1,38 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности  $6,28 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, количество вымороженной влаги 0,87, температура поверхности минус 21,78 (приблизительно – минус 19,89) °С, температура центра минус 16,11 °С, продолжительность замораживания соответственно 1,7 и 2,0 ч, количество отведенной теплоты от 10 кг фарша 3182,3 или 3135 кДж.

### Задача 2

Рассчитать теплофизические характеристики, расход теплоты, продолжительность размораживания для тех же продуктов, что и продолжительность замораживания: блок рыбного фарша. Начальная температура продукта равна среднеобъемной температуре замороженного продукта, а температуру среды принимаем равной 20 °С. Конечной считаем криоскопическую температуру.

#### Решение:

Теплофизические характеристики размороженного продукта:

– теплоемкость

$$c_0 = 4,19 \cdot 0,77 + 1,46 \cdot (1 - 0,77) = 3,56 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

– температуропроводность

$$a_0 = \frac{\lambda_0}{c_0 \rho} = \frac{0,47}{3,56 \cdot 10^3 \cdot 1020} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Расход теплоты на размораживание продукта до  $t_{кр}$

$$Q_p = G [c_m (t_{кр} - t_n) + W \omega r_a] \\ = 10 \cdot [2,16 \cdot (-1 - (-18)) + 0,77 \cdot 0,87 \cdot 335,2] = 2612,7 \text{ кДж}$$

или приблизительно

$$Q_p = G (i_k - i_n) = 10 \cdot (266 - 5) = 2610 \text{ кДж.}$$

Продолжительность процесса размораживания по формуле (38)

$$\tau_p = \frac{261,27 \cdot 10^3 \cdot 1020 \cdot 1 \cdot 0,023}{20 - (-1)} \left( \frac{0,023}{2 \cdot 0,47} + \frac{1}{50} \right) 1,3 = 13966,8 \text{ с} = 3,9 \text{ ч.}$$

Продолжительность процесса размораживания по формуле (39):

$$q_m = W \omega r_a = 0,77 \cdot 0,87 \cdot 335,2 = 224,55 \text{ кДж/кг.}$$

$$Bi = 50 \cdot 0,023 / 0,47 = 2,5.$$

Следовательно,  $\mu_1 = 1,1352$

$$\tau_p = \frac{224550 \cdot 1020 \cdot 0,023}{20 - (-1)} \frac{2,5}{2 \cdot 50} \left( 1 + \frac{2 \cdot 3560}{1,1352^2 \cdot 224550} (20 - (-1)) \right) \\ = 9512,1 \text{ с} = 2,6 \text{ ч.}$$

Ответ: теплоемкость блока рыбного фарша размороженного 3,56 кДж/(кг·К), коэффициент температуропроводности  $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , продолжительность размораживания соответственно 3,9 и 2,6 ч, количество отведенной теплоты от 10 кг фарша 2612,7 или приближенно 2610 кДж.

Таблица 8 – Варианты заданий

Номер варианта	Условия задачи
1	Определить среднеконечную температуру при замораживании тушки цыпленка бройлера, если $t_{\text{в}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_{\text{ц}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$
2	Определить количество теплоты, которая будет отведена при закаливании 15 кг сливочного мороженого в камере интенсивного охлаждения и замораживания, при следующих условиях: $t_{\text{н}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_{\text{к}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$
3	Определить продолжительность замораживания полуфабриката (треска филе) толщиной 6 см, $\rho = 1052 \text{ кг}/\text{м}^3$ , $t_{\text{кр}} = -1,9 \text{ }^\circ\text{C}$ при следующих параметрах: $t_{\text{н}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_{\text{ц}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$ , в камере с принудительной циркуляцией воздуха $t_{\text{в}} = -22 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\alpha = 30 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$
4	Определить продолжительность замораживания говяжьей вырезки толщиной 8 см, $\rho = 1077 \text{ кг}/\text{м}^3$ , $t_{\text{кр}} = -1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , упакованной в полимерную пленку в морозильной камере с естественной циркуляцией воздуха при следующих параметрах: $t_{\text{н}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_{\text{ц}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_{\text{в}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\alpha = 15 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ , $l_{\text{уп}} = 100 \text{ мкм}$ , $\lambda_{\text{уп}} = 0,48 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$

**Отчет о проделанной работе должен содержать:**

- цель работы;
- решение задач.

**Контрольные вопросы**

1. Определение процесса замораживания.
2. Какую температуру называют криоскопической?
3. От каких факторов зависит количество вымороженной воды?
4. Какие формулы используются для расчета количества вымороженной воды?
5. Почему изменяются теплофизические показатели мороженых продуктов в сравнении с охлажденными?
6. Чем отличается расчет критерия Био для мороженых продуктов?
7. Как рассчитывается теплота, отводимая от продукта при замораживании?
8. Какие процессы характеризуют слагаемые в формуле для расчета теплоты, отводимой от продукта при замораживании?



9. От каких факторов зависит продолжительность процесса замораживания?
10. Чем отличается формула Д. Г. Рютова от формулы Р. Планка?
11. Дайте определение процессу размораживания.
12. Какие способы размораживания Вам известны?
13. Как происходит размораживание продуктов в воде и на воздухе?
14. Какие изменения происходят в продукте при размораживании?
15. Как рассчитать количество теплоты, необходимое для размораживания продукта?
16. Какие формулы используют для расчета продолжительности размораживания?
17. Теплофизические характеристики замороженного или размороженного слоя используются при расчетах продолжительности размораживания?
18. Что обозначает коэффициент  $m$  в формуле Г. Б. Чиждова?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьева, Н. Н. Холодильная техника и технология: в 2 ч.: учеб. пособие / Н. Н. Воробьева. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2006. – Ч. 1. – 164 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=141466> (дата обращения: 19.12.2020). – Текст: электронный.
2. Воробьева, Н. Н. Холодильная техника и технология: в 2 ч.: учеб. пособие / Н. Н. Воробьева. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2006. – Ч. 2. – 104 с. – Режим доступа: по подписке.

– URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=141467> (дата обращения: 19.12.2020). – Текст: электронный.

3. Головкин, Н. А. Холодильная технология пищевых продуктов: учеб-ник / Н. А. Головкин. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 240 с.

4. Суслов, А. Э. Холодильная техника и технология: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению подгот. специальности 260501.65 – Технология продуктов общест. питания / А. Э. Суслов, А. С. Бестужев; Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: КГТУ, 2010. – 122 с.

5. Титлов, А. С. Холодильная техника в пищевой промышленности: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр.: 151000 – Технол. машины и оборудование (специализации: "Машины и аппараты пищ. пр-в"; "Пищ. инженерия малых предприятий"), 240700 – Биотехнология, 260200 – Продукты питания живот. происхождения, 260800 – Технология продукции и орг. обществ. питания / А. С. Титлов, А. С. Бестужев, С. Ф. Горыкин; Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: КГТУ, 2012. – 250 с.

6. Холодильная технология пищевых продуктов: в 2 ч.: учеб. / В. И. Филиппов, М. И. Кременевская, В. Е. Куцакова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2008. – Ч. 2. Технологические основы. – 572 с.

7. Эрлихман, В. Н. Холодильная технология. Современные морозильные аппараты: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению подгот. специальности 260600 – Пищевая инженерия / В. Н. Эрлихман, А. Э. Суслов; Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: КГТУ, 2008. – 88 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

Таблица П.А.1 – Значения коэффициентов теплопередачи для наружных стен

Среднегодовая температура наружного воздуха, °С	Коэффициент теплопередачи К, Вт/(м <sup>2</sup> ·К), при температуре воздуха в камере, °С						
	-40÷-30	-25÷-20	-15÷-10	-4	0	4	12
0 и ниже	0,21	0,26	0,33	0,47	0,52	0,58	0,70
1-8	0,2	0,23	0,28	0,35	0,4	0,44	0,64
9 и выше	0,19	0,21	0,23	0,28	0,30	0,35	0,52

Таблица П.А.2 – Значения коэффициентов теплопередачи внутренних стен, отделяющих камеры от неохлаждаемых коридоров, тамбуров, вестибюлей и других помещений

Температура воздуха в помещении, °С	-30	-20	-10	-4	4	12
Коэффициент теплопередачи К, Вт/(м <sup>2</sup> ·К),	0,27	0,28	0,33	0,35	0,52	0,64

Таблица П.А.3 – Значения коэффициентов теплопередачи перегородок между камерами, а также междуэтажных перекрытий в зависимости от характера разделяемых помещений

Наименование помещений	Коэффициент теплопередачи К, Вт/(м <sup>2</sup> ·К),
Между камерами	
замораживания и охлаждения	0,23
замораживания и хранения охлажденных грузов	0,26
замораживания и хранения мороженных грузов	0,47
хранения охлажденных и мороженных грузов	0,28
охлаждения и хранения мороженных грузов	0,33
охлаждения и хранения охлажденных грузов	0,52
с одинаковыми температурами	0,58

Таблица П.А.4 – Значения коэффициентов теплопередачи обогреваемых полов на грунтах

Температура воздуха в охлаждаемом помещении, °С	+4÷-4	-10	-20÷-30
Коэффициент теплопередачи К, Вт/(м <sup>2</sup> ·К),	0,41	0,28	0,33

Таблица П.А.4 – Значение коэффициентов теплоотдачи и соответствующее термическое сопротивление, α Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Поверхности помещений	Коэффициент теплоотдачи α, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Термическое сопротивление 1/α, м <sup>2</sup> ·К/Вт
Наружные поверхности наружных стен и покрытий	23,3	0,043
Внутренние поверхности помещений без принудительной циркуляции воздуха: стены, полы и потолок	8 6-7	0,125 0,167-0,143
Внутренние поверхности помещений с умеренной циркуляцией воздуха (хранение охлажденных продуктов)	9	0,111
Внутренние поверхности помещений с усиленной циркуляцией воздуха (камеры охлаждения и замораживания)	10,5	0,095

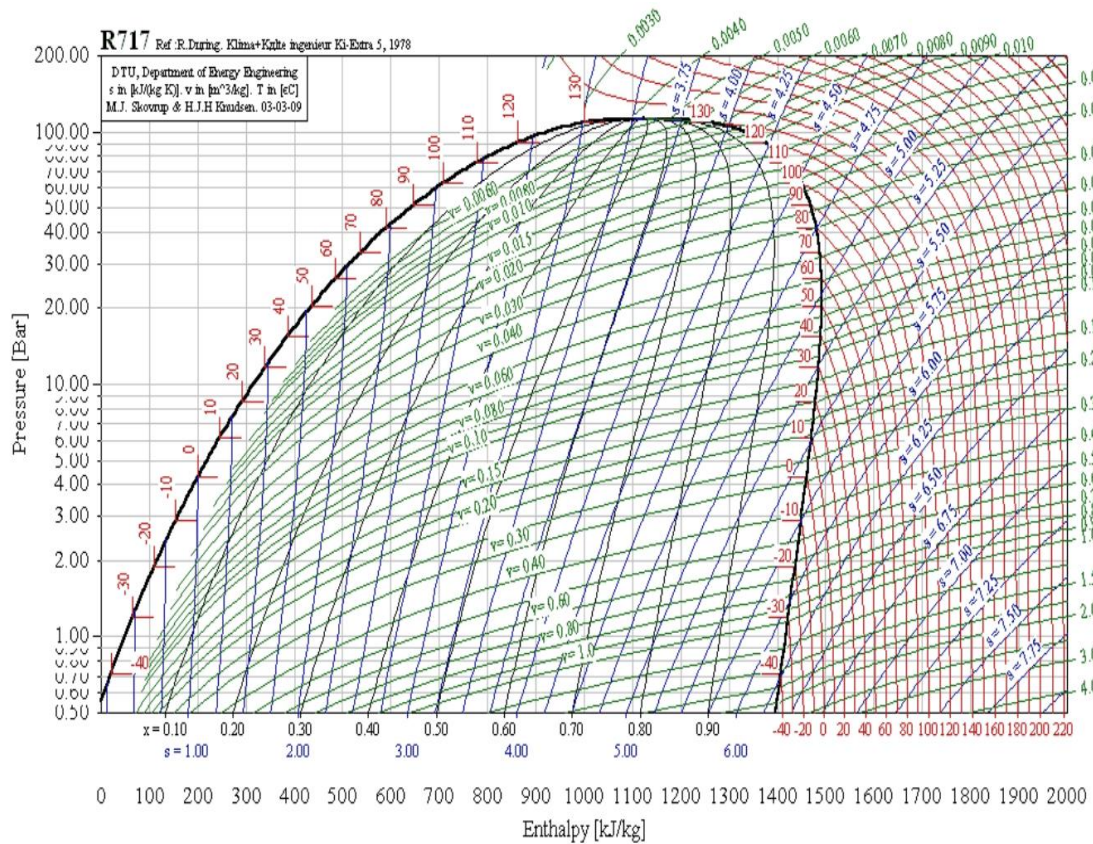
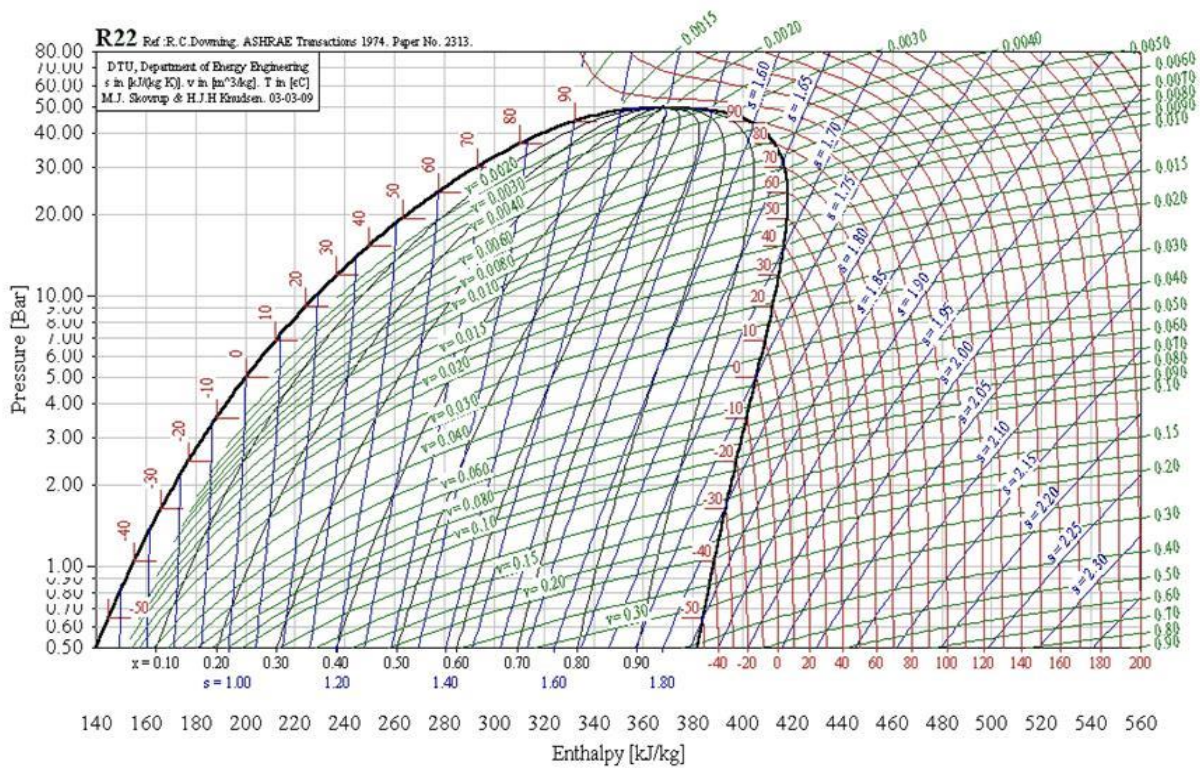
## Приложение Б

Таблица П.Б.1 – Расчетная температура и относительная влажность наружного воздуха для некоторых географических пунктов

Город	Температура, °С		
	среднегодовая	летняя	зимняя
Архангельск	-0,6	27	-32
Брянск	5,5	30	-23
Владивосток	3,9	28	-12
Воронеж	5,2	32	-25
Грозный	10,1	34	-16
Иваново	3,1	31	-28
Иркутск	-1,1	29	-36
Калининград	7,9	19,1	-1,9
Красноярск	0,5	30	-40
Москва	4,8	30	-26
Санкт-Петербург	4,3	27	-24
Магнитогорск	1,2	31	-32

Таблица П.Б.2 – Избыточная разность температур ( $\Delta t_c$ , °С)

Стена	Географическая широта									
	40°	50°	60°	От 40 до 60°						
	Ю			ЮВ	ЮЗ	В	З	СВ	СЗ	С
Бетонная	5,9	8,0	9,8	8,8	10,0	9,8	11,7	5,1	5,6	0
Кирпичная	6,6	9,1	11,0	9,9	11,3	11,0	13,2	5,8	6,3	0
Побеленная известью или отштукатуренная с окраской в светлый цвет	3,6	4,9	6,0	5,4	6,1	6,0	7,2	3,2	3,5	0
Побеленная известью или отштукатуренная с краской в темный цвет	5,1	7,1	8,5	7,7	8,8	8,5	10,2	4,5	4,9	0
Облицованная белыми глазурованными плитками	2,3	3,2	3,9	3,5	4,0	3,9	4,7	2,0	2,2	0

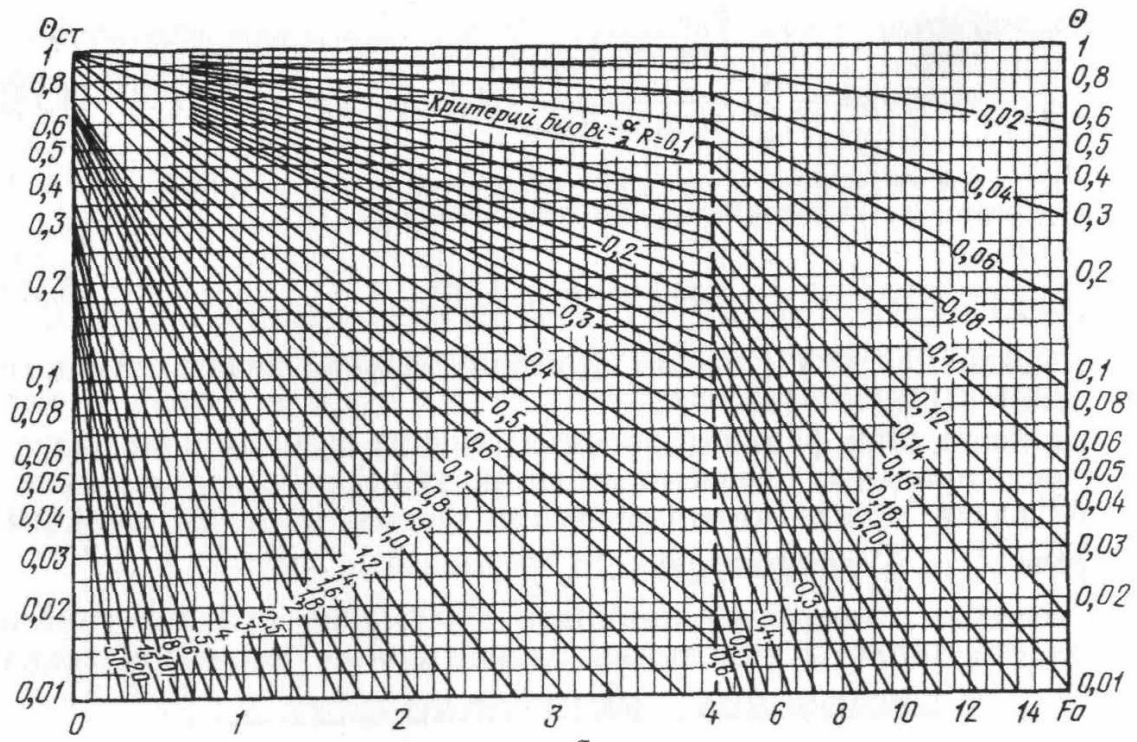


Активация Windows

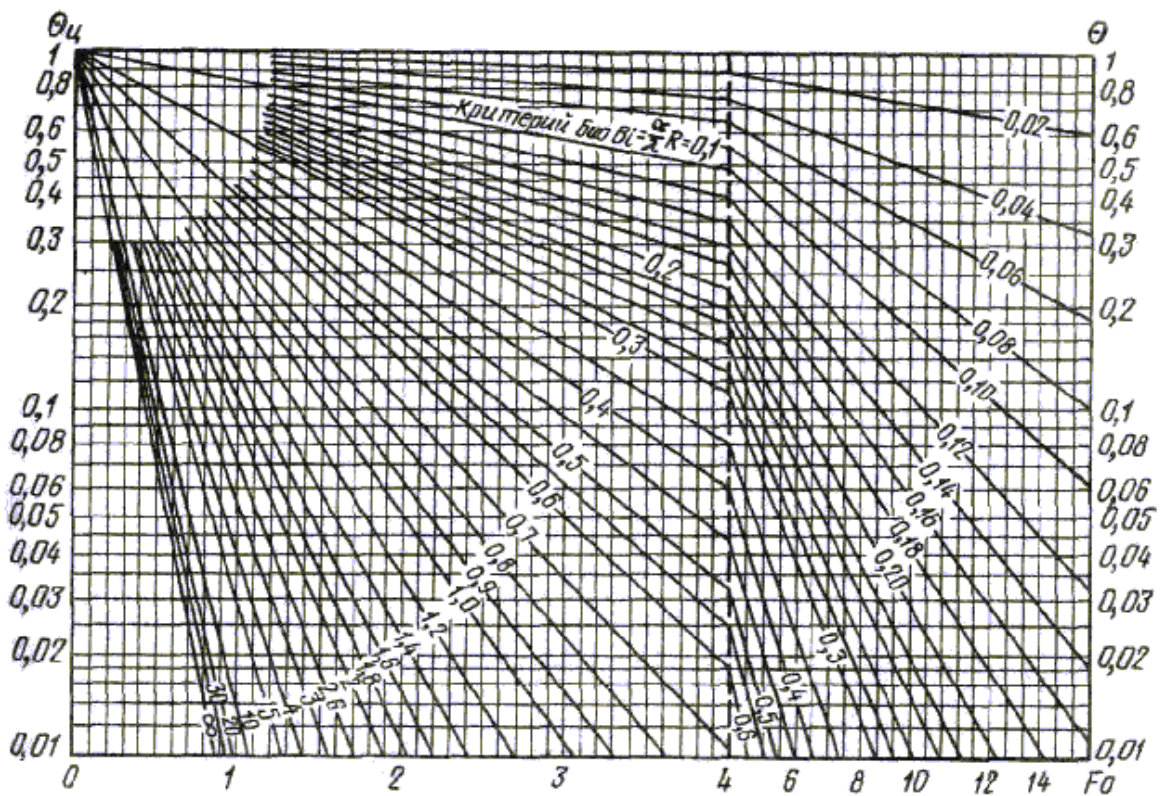
Рисунок П.В.1 – Термодинамические диаграммы

Приложение Г





а)

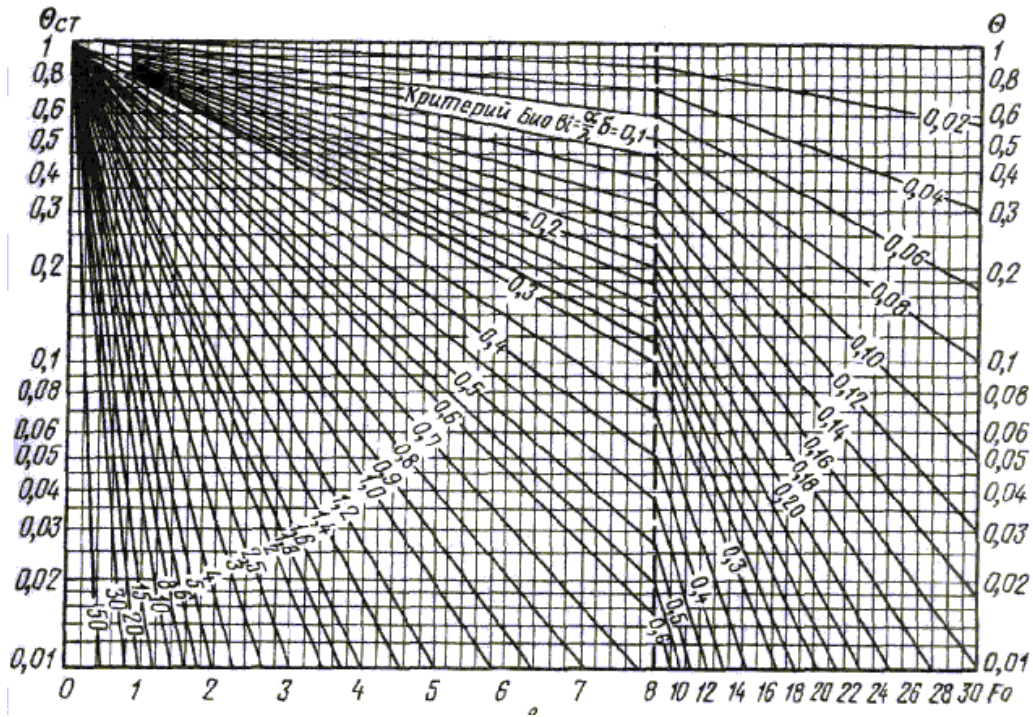


б)

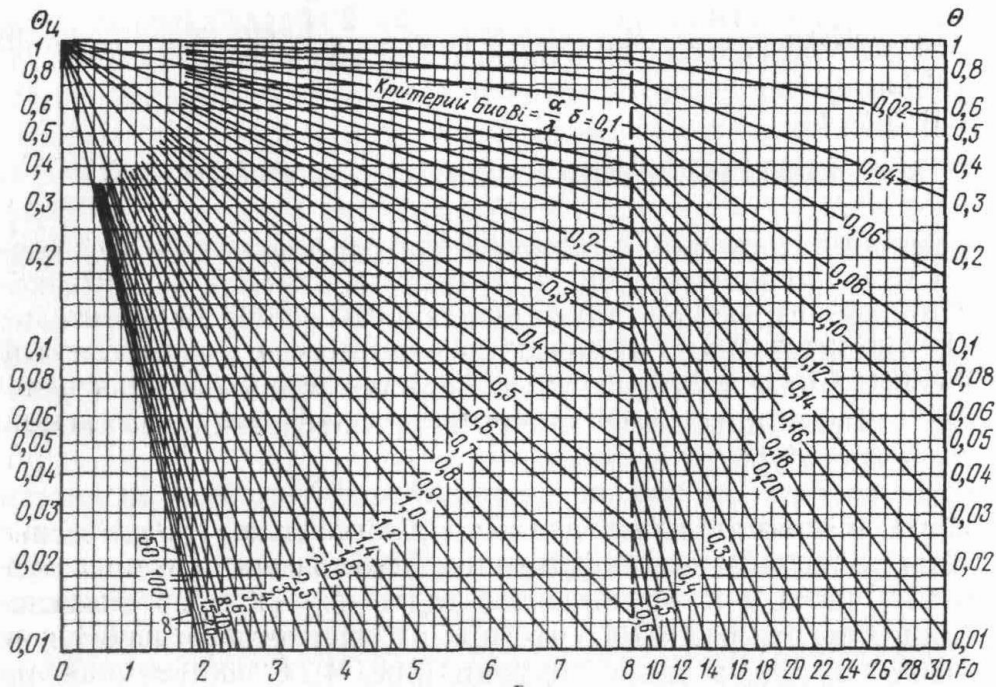
Рисунок П.Г.1 – Номограммы для определения продолжительности охлаждения:

а – на поверхности цилиндра; б – на оси цилиндра





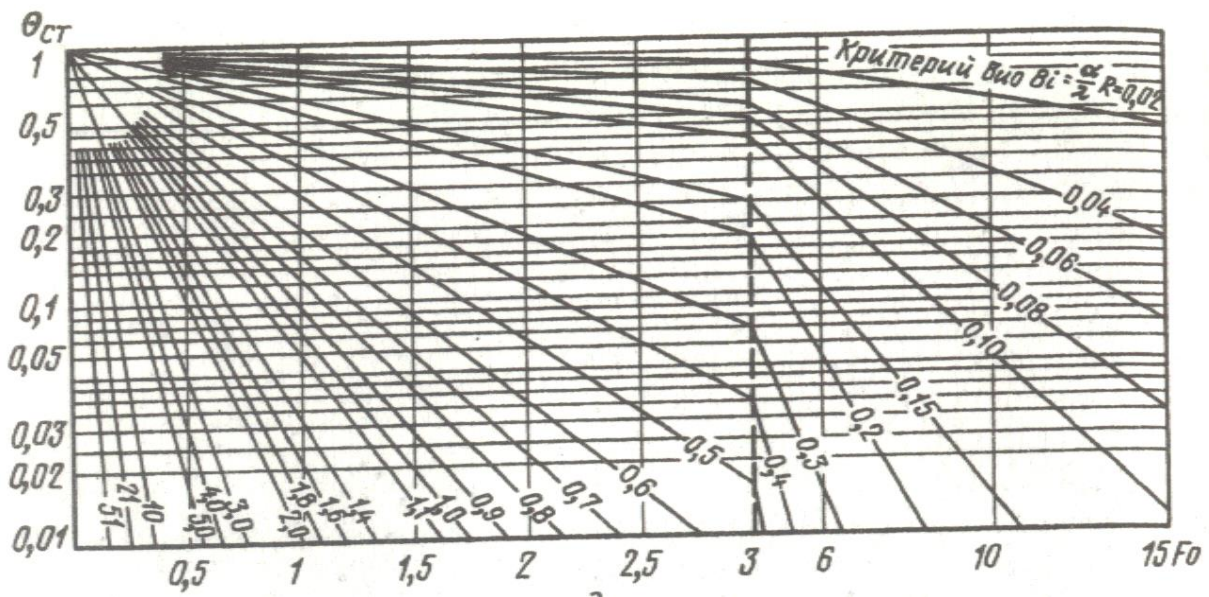
в)



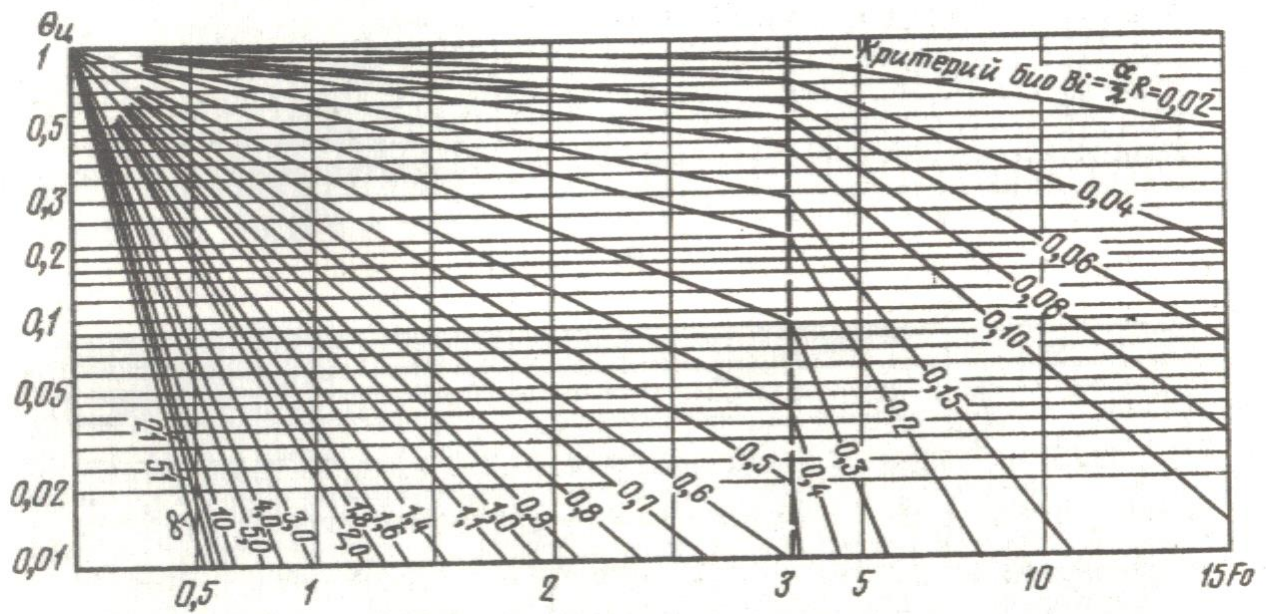
г)

Рисунок П.Г.1 – Продолжение:  
в – на поверхности пластины; г – в центре пластины





д)



е)

Рисунок П.Г.1 – Окончание:  
д – на поверхности шара; е – в центре шара



Локальный электронный методический материал

Оксана Вячеславовна Анистратова

**ХОЛОДИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБЩЕСТВЕННОГО  
ПИТАНИЯ**

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 3,6. Печ. л. 3,1

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1