

1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

1.1. Общие сведения

Тепловые расчеты процессов холодильной технологии пищевых продуктов могут быть выполнены только в том случае, если известны теплофизические характеристики этих продуктов и их зависимость от температуры. Наиболее важные теплофизические характеристики пищевых продуктов: удельная теплоемкость c [Дж/(кг • К)]; коэффициент теплопроводности λ [Вт/(м • К)]; коэффициент температуропроводности a (м²/с); плотность продукта ρ (кг/м³). При этом

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (1.1)$$

К теплофизическим характеристикам относят температуру начала замерзания пищевых продуктов, называемую криоскопической температурой $t_{кр}$ (°С); теплоту кристаллизации влаги r (Дж/кг), а также некоторые менее употребительные, такие, как теплота затвердевания жиров в продукте и теплота дыхания растительных продуктов.

Теплофизические характеристики продуктов зависят от их природных свойств (состава, строения). Различия свойств продуктов определяются их химической и физической неоднородностью. Химическая неоднородность зависит от состава продукта, физическая — от структуры и стереометрического распределения отдельных составных частей в продукте. В понятие структуры включают размер и направление волокон у животных продуктов, пористость, размер клеток и распределение газовых включений у растительных. Различие теплофизических характеристик продуктов одного товарного наименования связано с различием их химического состава (содержания влаги, белка, жира и сухих веществ).

Теплофизические характеристики зависят от температуры. При отсутствии фазовых переходов (отвердевания, плавления, льдообразования) эти изменения невелики. При переходе воды в твердую фазу эти изменения значительны, что связано с различием свойств воды и льда (табл. 1.1).

Рассмотрим закономерности изменения каждой из ТФХ по отдельности.

Таблица 1.1 - Теплофизические характеристики (ТПФ) воды и льда

| Характеристика | Вода | Лед |
|---|-------|-------|
| Удельная теплоемкость c , Дж/(кг • К) | 4,19 | 2,10 |
| Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м • К) | 0,554 | 2,210 |
| Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$, м ² /с | 0,13 | 1,14 |
| Плотность ρ , кг/м ³ | 999,5 | 916 |

1.2. Криоскопическая температура и теплота кристаллизации влаги

Вода — основной компонент сырья и готовых пищевых продуктов. Массовая доля воды колеблется в широких пределах: в растительных продуктах — от 80 % для груш до 95 % для помидоров и огурцов; в животных продуктах—от 50 % для жирной свинины до 78 % для говядины.

В пищевых продуктах вода содержится в виде растворов. Содержание в воде веществ, образующих с ней истинный раствор, обуславливает изменение ее характерных свойств: снижение температуры начала замерзания (криоскопической температуры), повышение температуры кипения и снижение давления водяного пара над раствором.

Криоскопическая температура подчиняется *закону Рауля*: понижение криоскопической температуры раствора $t_{кр}$ по сравнению с температурой замерзания чистого растворителя t_0 (для воды $t_0 = 0$ °С) пропорционально суммарной моляльной концентрации растворенных веществ. Коэффициент

пропорциональности ε , называемый криоскопической постоянной, для воды равен $1,86 \text{ (кг} \cdot \text{°C)/моль}$.

При температурах, равных криоскопической и ниже нее, образующиеся кристаллы льда практически не содержат растворенных веществ, поэтому при понижении температуры одно и то же количество растворенных веществ приходится на все меньшее количество воды; следовательно, концентрация раствора повышается и криоскопическая температура его понижается. Это приводит к тому, что вода в продукте вымораживается постепенно при понижении температуры. Таким образом, естественно появляется понятие доли вымороженной воды $\omega(t)$ как функции температуры (табл. 1.2).

Примечания к таблице №1.2: 1-й вариант — доля вымороженной воды от общего содержания влаги; 2-й вариант — доля вымороженной воды от содержания свободной влаги.

Безразмерная величина $\omega(t)$ имеет смысл доли содержащейся в продукте воды, которая переходит в лед при понижении температуры продукта до t . Очевидным образом функция $\omega(t)$ имеет смысл лишь при $t < t_{кр}$, причем $\omega(t_{кр}) = 0$, поскольку при криоскопической температуре вода лишь начинает вымерзать.

Используя закон Рауля, можно просто получить явный вид функции $\omega(t)$. Действительно, при любой температуре t доля вымороженной воды должна быть такова, чтобы криоскопическая температура оставшегося раствора равнялась t . Но разность температур криоскопической и t_o пропорциональна моляльной концентрации растворенных веществ. Поскольку количество растворенных веществ остается неизменным, то эта концентрация, в свою очередь, обратно пропорциональна доле оставшейся незамерзшей воды, которая при температуре t равна $1 - \omega(t)$, а при криоскопической температуре $t_{кр}$ равна 1.

Таблица 1.2 – Экспериментальные значения количества вымороженной воды в зависимости от температуры

| Продукт | Влажность ω , (%) | Доля вымороженной воды ω (%) при различных температурах, С° | | | | | | | | | | Количество незамерзшей воды | |
|------------------------|--------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|
| | | -5 | | -10 | | -15 | | -20 | | -30 | | Кг на 1 кг сухого вещества | % с общего количества |
| | | 1-й вариант | 2-й вариант | 1-й вариант | 2-й вариант | 1-й вариант | 2-й вариант | 1-й вариант | 2-й вариант | 1-й вариант | 2-й вариант | | |
| Говядина тощая | 74 | 83 | 74 | 93 | 82 | 97 | 85 | 99 | 87 | 100 | 88 | 0,35 | 12 |
| Пикша | 83,5 | 87 | 80 | 94 | 87 | 97 | 89 | 98 | 91 | 100 | 92 | 0,39 | 8 |
| Треска | 80,5 | 85 | 77 | 94 | 84 | 97 | 87 | 98 | 89 | 100 | 91 | 0,39 | 9 |
| Морской окунь | 79 | 84 | — | 94 | — | 97 | — | 98 | — | 100 | — | 0,39 | — |
| Яйцо куриное (цельное) | 74 | 90 | 85 | 95 | 89 | 98 | 91 | 99 | 92 | 100 | 93 | 0,20 | 7 |
| Желток яйца | 50 | 89 | 80 | 94 | 85 | 97 | 86 | 98 | 87 | 100 | 87 | 0,40 | 13 |
| Белок яйца | 86,5 | 93 | 87 | 96 | 91 | 98 | 93 | 99 | 94 | 100 | 94 | 0,40 | 6 |
| Белый хлеб | 46 | 50 | 15 | 87 | 45 | 97 | 53 | 99 | 54 | 100 | 54 | 0,30 | 46 |
| Пекарские дрожжи | 72 | — | 68 | — | 80 | — | 85 | — | 88 | — | 89 | — | 11 |
| Фруктовые соки | 88 | 75 | 72 | 87 | 85 | 93 | 90 | 96 | 93 | 100 | 96 | 0,20 | 3 |
| Зеленый горошек | 78 | 68 | 64 | 86 | 80 | 92 | 86 | 96 | 89 | 100 | 92 | 0,2-0,3 | 7 |
| Фасоль | 89 | 84 | — | 92 | — | 96 | — | 98 | — | 100 | — | 0,2-0,3 | — |
| Шпинат | 93 | 95 | 88 | 97 | 93 | 98 | 95 | 99 | 96 | 100 | 97 | 0,20 | 2 |

Таким образом, имеем

$$\frac{1 - \omega(t)}{1} = \frac{t_{кр} - t_0}{t - t_0}; \quad \omega(t) = \frac{t - t_{кр}}{t - t_0} = 1 - \frac{t_{кр}}{t} . \quad (1.2)$$

Выражение (1.2) просто и удобно, и им широко пользуются в холодильной технологии. Однако оно не вполне точное: опытные и расчетные значения со различаются на 7...10 %, причем наибольшее различие приходится на область низких температур.

Во-первых, закон Рауля верен лишь для достаточно разбавленных растворов, для концентрированных растворов он перестает соблюдаться. Из формулы (1.2) следует, что полностью вода может замерзнуть лишь асимптотически при бесконечно низкой температуре, ибо $\omega(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow -\infty$, что невозможно. На самом деле существует конечная температура, называемая эвтектической, при которой вся вода в растворе кристаллизуется полностью. Для большинства пищевых продуктов эвтектическая температура составляет от -55 до -86 °C.

Во-вторых, часть воды, содержащаяся в пищевых продуктах, вообще не может перейти в лед ни при каких температурах. Объясняется это присутствием в пищевых продуктах связанной воды, отличающейся от свойств чистой воды.

Примерные значения криоскопической температуры для различных пищевых продуктов следующие: яйца, салат: $t_{кр} = -0,5$ °C; молоко, пресноводная рыба: $t_{кр} = -0,8$ °C; мясо, томаты: $t_{кр} = -1$ °C; лук, горох: $t_{кр} = -1,3$ °C; бобы $t_{кр} = -1,8$ °C; яблоки, груши, сливы, картофель, морская рыба: $t_{кр} = -2,4$ °C; апельсины, лимоны, виноград: $t_{кр} = -3$ °C; вишни $t_{кр} = -3,5$ °C; бананы $t_{кр} = -4$ °C.

Выделение теплоты кристаллизации - результат изменения общей внутренней энергии вещества вследствие сокращения движения молекул воды, а освободившаяся при этом энергия выделяется в виде теплоты фазового

превращения, обычно называемой скрытой теплотой льдообразования, которая для чистой воды составляет $q_0=334,3$ кДж/кг. Обратная картина наблюдается при плавлении кристаллов льда. Более точно можно вычислить q_0 в зависимости от температуры t , при которой происходит кристаллизация. При этом пользуются формулой

$$q_0 = 334,3 + 2,12 t + 0,0042t^2, \quad (1.3)$$

Выделившаяся при замораживании пищевых продуктов теплота кристаллизации q пропорциональна массе вымерзшей воды и поэтому является функцией температуры:

$$q = q_0 \cdot W \cdot \omega(t) = q_0 \cdot W \frac{t-t_{кр}}{t-t_0}, \quad (1.4)$$

где W — содержание в продукте свободной (т. е. способной к вымораживанию) влаги.

1.3. Плотность

Плотность $\rho = m/W$ подчиняется закону аддитивности, и соответственно этому пищевые продукты можно представить как смеси отдельных компонентов. Если массу продукта обозначить как $M_{см}$, массы составляющих ее компонентов как m_1, m_2, \dots, m_n , тогда $M_{см} = m_1 + m_2 + \dots + m_n$. Плотность продукта можно обозначить как $\rho_{см}$, а плотности составляющих компонентов — $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$. Соответственно $\rho_{см}$ можно представить как

$$\rho_{см} = \rho_1 \frac{m_1}{M_{см}} + \rho_2 \frac{m_2}{M_{см}} + \dots + \rho_n \frac{m_n}{M_{см}}, \quad (1.5)$$

При замораживании плотность продуктов уменьшается обычно на 5... 8 % вследствие снижения плотности воды, которая превращается в лед.

Кроме того, например, свободное пространство в штабеле груза, заполненное воздухом, играет важную роль при хранении плодов и овощей. Скорость воздуха в насыпи при активном вентилировании зависит от соотношения между физической ρ и насыпной ρ_n плотностями растительного сырья.

Для капусты и яблок

$$\rho_n = 0,55\rho ;$$

для остальных видов сырья, кроме листовых овощей,

$$\rho_n = 0,6\rho ;$$

Скважность (порозность) насыпи ϵ_k плодов и овощей представляет собой часть объема насыпи сырья, занятую воздухом, и может быть выражена уравнением (в долях единицы):

$$\epsilon_k = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} = 1 - \frac{V_{np}}{V}, \quad (1.6)$$

где V_{np} — объем насыпи сырья, м^3 ;

V — общий объем, м^3 .

Для большинства растительных продуктов $\epsilon_k = 0,35...0,47$.

Плотность пищевых продуктов изменяется при нагревании и охлаждении, однако в численном выражении это изменение незначительно.

Рассмотрим изменение плотности сырого фарша сосисок при нагревании и охлаждении (табл. 1.3). Химический состав фарша: массовая доля белка 0,1225; жира — 0,2060; влаги — 0,6562; золы — 0,0224.

Таблица 1.3 – Изменение плотности сосисок без оболочки в процессе охлаждения и нагревания

| Температура, К | Плотность ρ , кг/м ³ |
|----------------|--------------------------------------|
| Охлаждение | |
| 343 | 1000 |
| 333 | 1021 |
| 323 | 1033 |
| 313 | 1041 |
| 303 | 1049 |
| 293 | 1057 |
| 283 | 1067 |
| 273 | 1074 |
| Нагревание | |
| 293 | 1023,0 |
| 303 | 1016,6 |
| 313 | 1009,8 |
| 323 | 1003,0 |
| 333 | 996,2 |
| 343 | 989,4 |
| 353 | 982 |

Существует ряд эмпирических формул, позволяющих рассчитать плотность пищевых продуктов в зависимости от составляющих компонентов. Этот метод основан на использовании закона аддитивности. Далее приведены соответствующие соотношения для различных пищевых продуктов.

Говядина. При $T > T_{кр}$ (где $T_{кр}$ — криоскопическая температура, К) плотность говядины зависит от массовых долей влаги w , жира $Ж$ и температуры (табл. 1.4). Для сырой говядины $T_{кр} = 272\text{К}$ ($w = 0,749$ кг/кг), для вареной $T_{кр} = 271\text{ К}$ ($w = 0,546$ кг/кг), где w — влажность, кг продукта/кг влаги.

Для определения плотности (кг/м³) говядины предложены формулы:

$$\text{при } 0,05 < \mathcal{K} < 0,42 \text{ и } T=273\text{K}, \rho = 1070 - 119 \mathcal{K}; \quad (1.7)$$

$$\text{при } 0,10 < \mathcal{K} < 0,50 \text{ и } T=278\text{K}, \rho = 1130 - 130 \mathcal{K}; \quad (1.8)$$

$$\text{при } 0,10 < \mathcal{K} < 0,50 \text{ и } T=298\text{K}, \rho = 1120 - 145 \mathcal{K}; \quad (1.9)$$

$$\text{при } 278 < T < 303\text{K (простая говядина)}, \rho = 1198 - 0,43 T, \quad (1.10)$$

Таблица 1.4 – Плотность говядины при $T=273...303$ К.

| Говядина | T , К | w | ρ , кг/м ³ |
|---|-----------|-------------|----------------------------|
| I категории | | | |
| $\mathcal{K} = 0,045$ | 273 | 0,727 | 1130 |
| $\mathcal{K} = 0,040$ | 273 | 0,745 | 1077 |
| II категории | 273...303 | 0,785 | 1064 |
| Жирная | 293 | — | 960...980 |
| Обезжиренная | 283 | 0,712 | 1090 |
| То же | — | 0,62...0,67 | 1020...1070 |
| » | 293 | — | 1058...1042 |
| » | — | — | 970...990 |
| Примечание. Приведены экспериментальные данные. | | | |

при $271 < T < 273$ К (сырая говядина; $w = 0,593$; $\mathcal{K} = 0,074$)

$$\rho = 1152 - 0,22 T; \quad (1.11)$$

при $271 < T < 373$ К (сырая говядина; $w = 0,749$; $\mathcal{K} = 0,025$)

$$\rho = 1176 - 0,39 T; \quad (1.12)$$

при $271 < T < 373$ К (вареная говядина; $w = 0,546$; $\mathcal{K} = 0,012$)

$$\rho = 1220 - 0,38 T; \quad (1.13)$$

при $303 < T < 353$ К (говядина I сорта, I категории)

$$\rho = 1306 - 0,8565 T. \quad (1.14)$$

Формулы (1.11) и: (1.13) свидетельствуют о том, что при одинаковой температуре плотность вареной говядины больше, чем сырой.

Формулы (1.10) - (1.14) позволяют рассчитать коэффициент объемного теплового расширения говядины, который в интервале $273...373$ К равен $0,45 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Плотность измельченной говядины зависит от давления (табл. 1.5).

Таблица 1.5 – Плотность (кг/м³) измельченной говядины

| Продукт | Состояние продукта | Давление $\rho \cdot 10^{-5}$, Н/м ² | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|--|------|------|------|
| | | 2 | 4 | 8 | 12 |
| Говядина высшего сорта измельченная | В сжатом состоянии | 1090 | 1097 | 1106 | 1170 |
| | После снятия давления | 1075 | 1082 | 1088 | 1092 |
| Фарш докторской колбасы | В сжатом состоянии | 1080 | 1090 | 1096 | 1100 |
| | После снятия давления | 1070 | 1075 | 1083 | 1088 |

Свинина. Плотность свинины с увеличением в ней массовой доли влаги, уменьшением массовой доли жира и снижением температуры возрастает (табл. 1.6).

Таблица 1.6 – Формулы для расчета плотности свинины.

| T , К | w , кг/кг | ρ , кг/м ³ |
|---|---------------|---------------------------------|
| - | 0,39...0,57 | $\rho = 890 + 110w$ |
| - | 0,015...0,358 | $\rho = 1094 - 216 \mathcal{K}$ |
| - | 0,143...0,175 | $\rho = 1102 - 198 \mathcal{K}$ |
| - | 0,249...0,617 | $\rho = 1110 - 200 \mathcal{K}$ |
| 272... 373 | 0,713* | $\rho = 1226 - 0,56 T$ |
| 271...373 | 0,572** | $\rho = 1273 - 0,60 T$ |
| * $\mathcal{K} = 0,071$. | | |
| ** Вареная свинина ($\mathcal{K} = 0,043$). | | |

Плотность соленой свинины больше, чем несоленой (из-за большой плотности соленого рассола, равной 1121 кг/м³). Плотность вареной свинины больше, чем сырой, так как в процессе варки она теряет жир.

Рыба. Плотность рыбы зависит от многих факторов, таких, как сортность, температура, масса единичного объекта и т. д. Рассмотрим зависимость плотности рыбы от ряда определяющих факторов на примере судака. Экспериментально установлено, что с увеличением массы неразделанного целого) судака и его мяса плотность увеличивается (табл. 1.7).

Физическая плотность мяса судака, взятого из различных частей рыбы неодинакова (табл. 1.8) из-за различия в химическом составе и консистенции.

На физическую плотность судака степень свежести оказывает незначительное влияние, а способ обработки — заметное (табл. 1.9).

Таблица 1.7 – Физическая плотность судака

| Масса, кг | Плотность ρ_f , кг/м ³ |
|----------------------------------|--|
| Целый судак ($T = 288$ К) | |
| 0,600 | 856 |
| 2,500 | 920 |
| 4,600 | 975 |
| Мясо судака ($w = 0,775$ кг/кг) | |
| 0,970 | 1062 |
| 1,630 | 1064 |
| 1,827 | 1067 |

Таблица 1.8 - Физическая плотность отдельных частей судака.

| Часть тела судака | ρ_f , кг/м ³ | Часть тела судака | ρ_f , кг/м ³ |
|---------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Мясо: | | | |
| из головной части спинки | 1065 | Кожа с чешуей | 1216 |
| из головной части брюшка | 1061 | Спинка у головы | 1064 |
| из хвостовой части брюшка | 1049 | Средняя часть | 1065 |
| Кожа без чешуи | 1119 | Задняя часть | 1059 |

Таблица 1.9 - Физическая плотность судака при разных способах обработки.

| Способ обработки рыбы | ρ_f , кг/м ³ | Способ обработки рыбы | ρ_f , кг/м ³ |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Неразделанная парная | 967 | Филе охлажденное | 1080 |
| Потрошенная парная | 1080 | Филе мороженое | 1026 |
| Мороженая | 985 | | |

Физическая плотность парного целого судака (929 кг/м³) из-за наличия плавательного пузыря намного меньше, чем потрошеного (1080 кг/м³).

Физическая плотность охлажденного судака (из-за различия в коэффициенте объемного теплового расширения) заметно больше (1078 кг/м³), чем мороженого (1026 кг/м³).

Растительные продукты. Плотность свежего растительного сырья даже в пределах одного вида имеет довольно значительный разброс. Она зависит от сорта, назначения продукта и анатомического строения (например, свекла сахарная и столовая, поверхностный слой и сердцевина моркови).

Влияет и предварительная обработка, в частности бланширование, которое применяют перед тепловым и холодильным консервированием практически для любого вида растительного сырья. Например, в процессе бланширования семян зеленой фасоли их физическая плотность ρ_{ϕ} (с учетом пористости) увеличивается, причем тем заметнее, чем выше температура агента нагревающей среды. Определяется это тем, что бланширование уменьшает пористость семян (табл. 1.10).

Бланширование яблок сопровождается поступлением воды в капилляры плодовой ткани, поэтому масса плодов увеличивается, а объем и пористость уменьшаются. По этой причине физическая плотность яблок при бланшировании возрастает (табл. 1.11, 1.12).

Таблица 1.10 – Физическая плотность семян зеленой фасоли в процессе бланширования (начальная плотность $\rho_{\phi} = 900 \text{ кг/м}^3$), кг/м^3

| Агент | T, К | Продолжительность бланширования, мин | | | | | | | | |
|-------|------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| Пар | 383 | 936 | 1002 | 1024 | 1030 | 1033 | 1030 | — | — | — |
| Вода | 373 | 945 | 994 | 1024 | 1030 | 1031 | 1030 | — | — | — |
| Вода | 363 | — | — | 968 | — | 986 | — | 988 | 990 | 983 |
| Вода | 353 | — | — | 957 | — | 963 | — | 964 | 967 | 966 |

Таблица 1.11 – Физическая плотность яблок при разных способах бланширования.

| Сорт | Бланширование | | Бланширование в сахарном сиропе в вакууме | |
|------------------|---------------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| | w, кг/кг | ρ_{ϕ} , кг/м^3 | w, кг/кг | ρ_{ϕ} , кг/м^3 |
| Ренет Симиренко | 0,807 | 924 | 0,842 | 951 |
| Бельфлер-китайка | 0,871 | 897 | 0,847 | 946 |
| Пепин лондонский | 0,873 | 951 | 0,848 | 885 |

Таблица 1.12 – Физическая плотность яблок при нагреве от 293 до 333 К.

| Сорт | Предварительная обработка | ρ_{ϕ} , кг/м^3 |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Ренет Симиренко | Отсутствует | 840 |

| 1 | 2 | 3 |
|------------------|----------------|-----|
| | Бланширование | 924 |
| | Вакуумирование | 951 |
| Бельфлер-китайка | Отсутствует | 804 |
| | Бланширование | 897 |
| | Вакуумирование | 946 |

1.4 Удельная теплоемкость

Основные сведения. Удельная теплоемкость — это величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо подвести (отвести) для нагревания (охлаждения) единицы массы тела на 1 К.

Пищевые продукты в значительной степени состоят из воды. Зависимость удельной теплоемкости воды в трех ее агрегатных состояниях (твердом, жидком и парообразном) от температуры показана на рис. 1.1.

Массовая удельная теплоемкость, так же как и плотность, подчиняется закону аддитивности и вычисляется по формуле:

$$c = \frac{m_1}{M_{см}} c_1 + \frac{m_2}{M_{см}} c_2 + \dots + \frac{m_n}{M_{см}} c_n , \quad (1.15)$$

где c_1, c_2, \dots, c_n — удельные теплоемкости компонентов смеси.

Удельная теплоемкость и плотность часто встречаются в виде комбинации

$$c_v = c\rho ,$$

где c_v — объемная теплоемкость, Дж/(м³ · К).

Если считать пищевые продукты двухкомпонентными смесями, содержащими w частей воды и $(1 - w)$ частей сухих веществ, с соответствующими массовыми удельными теплоемкостями воды c_w и сухих веществ c_c , то теплоемкость продукта до начала льдообразования

$$c_0 = c_w w + c_c(1 - w). \quad (1.16)$$

Теплоемкость сухих веществ продуктов животного происхождения составляет 1,38...1,68, растительного происхождения 0,71...1,36 кДж/(кг · К).

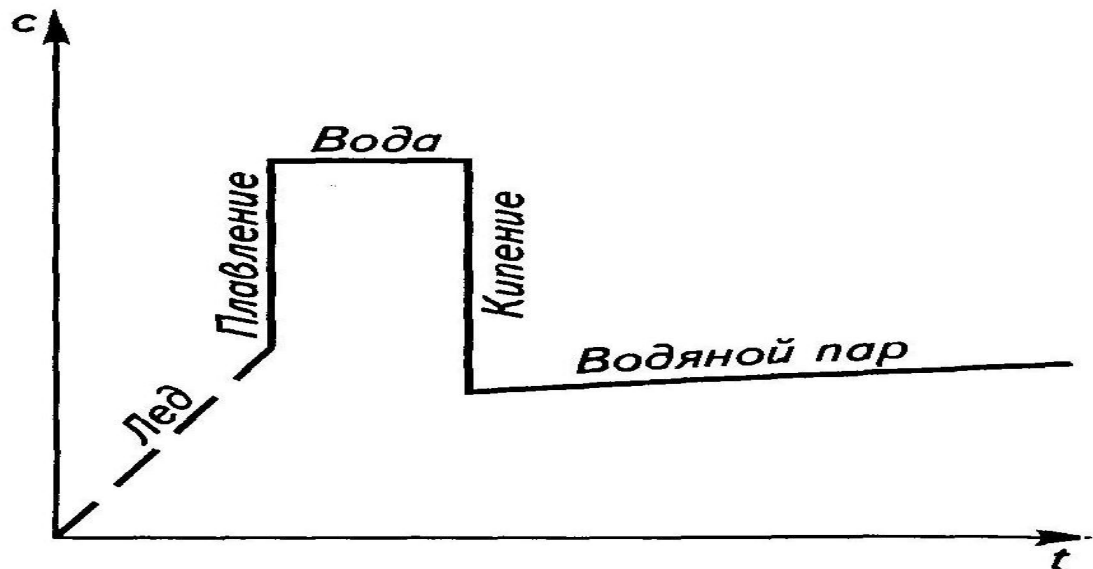


Рисунок 1.1 – Зависимость удельной теплоемкости воды c (в различных агрегатных состояниях) от температуры t

Поскольку при отрицательных температурах часть воды в продукте w превращается в лёд, теплоёмкость которого c_l , то расчётная удельная теплоёмкость мороженого продукта c_m определяется по формуле:

$$c_m = c_w w(1 - \omega) + c_l \omega w + c_c(1 - w), \quad (1.17)$$

$$\omega = 1 - \frac{t_{кр}}{t},$$

где $t_{кр}$ -криоскопическая температура, °С;

t - температура продукта, °С.

Приняв $c_w = 4,19$ кДж/(кг · К) и $c_l = 2,1$ кДж/(кг · К), уравнение (1.17) можно преобразовать в следующее:

$$c_m = c_0 - 2,1w\omega, \quad (1.18)$$

Количество отводимой теплоты льдообразования замораживаемой единицы массы продукта при изменении температуры на один градус приблизительно может быть аппроксимировано выражением

$$q = r_3w(\omega_1 - \omega_2), \quad (1.19)$$

где r_3 — удельная теплота замораживания;

ω_1, ω_2 - соответствующие значения доли вымороженной воды.

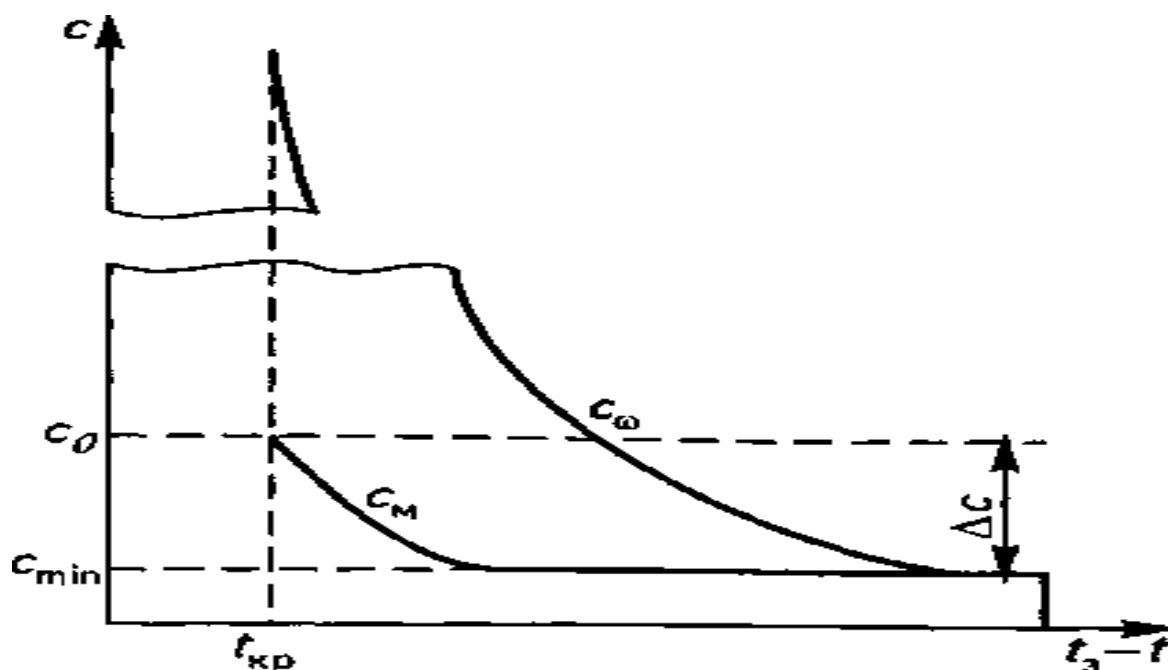


Рисунок 1.2 – Зависимость удельной c_m и полной удельной теплоемкости c_w пищевых продуктов от температуры t .

Следует обратить внимание на то, что величина $(\omega_1 - \omega_2)$ зависит от диапазона температур, в котором выбирается один градус.

Сумма расчетной теплоемкости c_m и теплоты льдообразования q при изменении температуры на один градус даст полную удельную теплоемкость (рис. 1.2):

$$c_w = c_m + r^3 w (\omega_2 - \omega_1), \quad (1.20)$$

Кроме того, имеется и приближенная эмпирическая формула, позволяющая рассчитать значение $c_w = f(t)$:

$$c_w = m - \frac{n}{t}, \quad (1.21)$$

где m , n — эмпирические коэффициенты, значения которых для ряда пищевых продуктов даны в таблице 1.13.

Таблица 1.3 – Значения эмпирических коэффициентов m и n для различных продуктов

| Продукт | m , Дж/(кг·К) | n , Дж/кг |
|------------------------------|-----------------|-------------|
| Бобы | 0,92 | 28,09 |
| Брокколи | 0,75 | 38,02 |
| Брюква | 0,33 | 45,64 |
| Горох | 0,42 | 36,38 |
| Дыня | 0,54 | 46,60 |
| Инжир | 0,50 | 49,45 |
| Капуста цветная | 0,71 | 37,56 |
| Морковь | 0,17 | 51,88 |
| Огурцы | 0,96 | 29,18 |
| Персики | 0,17 | 57,31 |
| Помидоры | 0,88 | 35,63 |
| Фасоль зеленая | 1,17 | 21,98 |
| Овощи (средние значения) | 0,63 | 37,89 |
| Пикша, треска, морской окунь | 0,75 | 37,22 |
| Креветки | 0,50 | 42,33 |
| Свинина: | | |
| $w = 0,52$ | 0,54 | 29,18 |
| $w = 0,768$ | 2,80 | 11,51 |
| Средние значения | 1,88 | 17,33 |
| Говядина | 0,67 | 39,32 |

Теплоемкость продукта может довольно сильно меняться в процессе холодильной обработки. Типичная зависимость объемной теплоемкости от температуры показана на графике (рис. 1.3), построенном для вещества, называемого Karlsruhe food simulator. Видно, что объемная теплоемкость незамерзшего тела в диапазоне от 0 до 40 °С практически не меняется и равна примерно $c_v = 3,7$ МДж/(м³ · К), что отвечает удельной теплоемкости $c = 3700$ Дж/(кг · К).

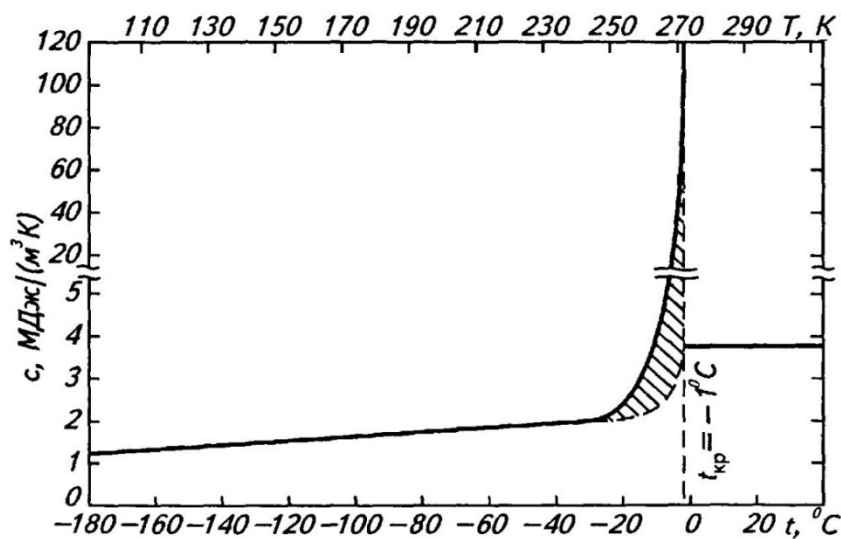


Рисунок 1.3 – Зависимость объемной теплоемкости от температуры для Karlsruhe food simulator (гель метяжидроэтилцеллюлозы, содержащий 77 % воды и 23 % сухой субстанции): *сплошная линия* — теплоемкость, учитывающая теплоту кристаллизации; *пунктирная* — без учета теплоты кристаллизации; *заштрихованная область* — разница между ними, равная теплоте кристаллизации.

Если температура становится ниже криоскопической, то теплоемкость понижается. Вначале, в диапазоне от $t_{kp} = -1$ °С примерно до -30 °С, пока идет вымораживание воды, понижение идет резко, причем объемная теплоемкость падает до величины, примерно равной $c_v = 1,8$ МДж/(м³ · К), что отвечает удельной теплоемкости $c = 1900$ Дж/(кг · К). При дальнейшем понижении температуры объемная теплоемкость продолжает уменьшаться, но уже медленно, примерно на 2...3 % на каждые 10 °С. При температуре -180

°С, близкой к температуре жидкого азота, объемная теплоемкость становится равной примерно 1,2 МДж/(м³ · К), что отвечает удельной теплоемкости 1300 Дж/(кг · К). Таким образом, теплоемкость сильно меняется лишь в том диапазоне температур, когда идет вымораживание основной части воды, что естественно, поскольку теплоемкости льда и воды различаются в 2 раза. При более низких температурах начинает играть роль уменьшение теплоемкости льда при понижении температуры, что можно описать приближенной зависимостью:

$$c_l = 2120 + 7,8t, \quad (1.22)$$

Удельные теплоемкости некоторых пищевых продуктов в областях температур больше и меньше $t_{кр}$ даны в табл. 1.14... 1.17, причем в табл. 1.15 и 1.17 в удельную теплоемкость включена теплота кристаллизации воды.

Говядина. Удельная теплоемкость говядины приведена в табл. 1.14 и 1.15.

Свинина. Удельная теплоемкость свинины приведена в табл. 1.16—1.18.

Таблица 1.14 – Удельная теплоемкость [Дж/(кг · К)] говядины при $T > T_k$

| Влажность w , кг/кг | Удельная теплоемкость c , Дж/(кг · К) |
|-----------------------|---|
| Тощая говядина | |
| 0,67 | 3520 |
| 0,68 | 3517 |
| 0,72 | 3250 |
| 0,735 | 3182 |
| 0,74 | 3520 |
| 0,76 | 3349 |
| 0,766 | 3530 |
| Жирная говядина | |
| 0,50 | 2512 |
| 0,51 | 2550 |
| 0,60 | 3056 |
| 0,62 | 2930 |

Таблица 1.15 – Удельная теплоемкость [Дж/(кг • К)] говядины при $T < T_k$

| Влажность | Температура T , К | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|------|-----------|------|------|------|------|-----------|
| w , кг/кг | 233 | 239 | 243...244 | 250 | 255 | 261 | 266 | 272...273 |
| 0,700 | — | — | — | — | 2742 | 3798 | 7704 | — |
| 0,705 | 2000 | 2110 | 2240 | 2460 | 2770 | 3580 | 5920 | 2338 |
| 0,715 | 1800 | 1842 | 1884 | 2010 | 2345 | 3433 | 6783 | 3978 |
| 0,741 | 2000 | 2110 | 2240 | 2470 | 2780 | 3630 | 6110 | 2510 |
| 0,760 | 1758 | — | 1884 | 2177 | 2638 | 3350 | 6657 | 4187 |
| 0,617* | — | — | 2050 | 2230 | 2530 | 3130 | 4850 | 1398 |
| * Вареная говядина. | | | | | | | | |

Таблица 1.16 – Удельная теплоемкость [Дж/(кг•К)] свинины при $T < T_k$.

| Влажность | Температура T , К | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| w , кг/кг | 283 | 288 | 293 | 298 | 303 | 308 | 313 | 318 | 323 |
| 0,768 | — | — | — | — | 3820 | — | — | — | — |
| 0,725 | 3500 | 3500 | 3525 | 3550 | 3500 | 3500 | 3550 | 3550 | 3650 |
| 0,609 | 3230 | 3130 | 3110 | 3100 | 3100 | 3100 | 3110 | 3130 | — |
| 0,560 | 3600 | 3450 | 3475 | 3550 | 4300 | 3400 | 3925 | 3450 | 3420 |
| 0,475 | 2980 | 2830 | 2780 | 2770 | 2760 | 2770 | 2780 | 2790 | — |
| 0,402 | 3700 | 3450 | 3450 | 3850 | 4100 | 3200 | 3175 | 3050 | 3105 |

Таблица 1.17 – Удельная теплоемкость [Дж/(кг • К)] свинины при $T < T_k$.

| Влажность | Температура T , К | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| w , кг/кг | 173 | 183 | 193 | 203 | 213 | 223 | 233 | 243 | 253 | 263 | 273 |
| 0,768 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3310 | 4320 | 3820 |
| 0,725 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3060 | 4550 | 4667 |
| 0,609 | 1290 | 1350 | 1430 | 1500 | 1580 | 1680 | 1800 | 1980 | 2340 | 3700 | 4500 |
| 0,560 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2400 | 4050 | 5400 |
| 0,475 | 1230 | 1300 | 1360 | 1430 | 1500 | 1590 | 1690 | 1850 | 2160 | 3310 | 5190 |
| 0,402 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2400 | 3850 | 5967 |

Таблица 1.18 – Удельная теплоемкость [Дж/(кг • К)] свинины.

| Мясо | Температура T , К | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 283...288 | 293...298 | 303...308 | 308...313 | 323...328 | 333...338 | 343...348 | 353...358 | 363...368 |
| Обезжиренное | 3685 | 3391 | 3098 | 3056 | 3140 | 3140 | 3224 | 3266 | 3266 |
| Полужирное | - | 4459 | 3308 | 3098 | 2701 | 2784 | - | - | - |

Удельная теплоемкость свинины в значительной степени зависит и от категории продукта (табл. 1.18).

Рыба. Удельная теплоемкость рыбы зависит от массовой доли влаги (влажности), при повышении которой удельная теплоемкость рыбы увеличивается (табл. 1.19). Зависимость ее от температуры в области положительных и отрицательных температур иллюстрируется табл. 1.20 и 1.21, причем в табл. 1.21 в удельную теплоемкость включена теплота кристаллизации воды.

Таблица – 1.19 Удельная теплоемкость [Дж/(кг* К)] трески при разной массовой доле влаги

| T, К | w, доли единицы | | | |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|
| | 0,214 | 0,451 | 0,702 | 0,928 |
| 263...293 | 1189 | 1260 | 1386 | 1516 |
| 243...293 | 1135 | 1181 | 1269 | 1373 |

Таблица 1.20 – Зависимость удельной теплоемкости мышечной ткани трески от температуры при $T < T_{кр}$ ($w = 0,803$)

| T, К | c, Дж/(кг · К) | T, К | c, Дж/(кг · К) |
|------|----------------|------|----------------|
| 270 | 2512 | 258 | 2177 |
| 268 | 2345 | 255 | 2177 |
| 265 | 2261 | 253 | 2177 |
| 263 | 2219 | 251 | 2135 |
| 260 | 2219 | 248 | 2135 |
| | | 243 | 2135 |

Таблица 1.21 – Зависимость удельной теплоемкости мышечной ткани трески от температуры при $T > T_{кр}$ ($w = 0,803$)

| T, К | c, Дж/(кг · К) | T, К | c, Дж/(кг · К) |
|------|----------------|------|----------------|
| 273 | 4145 | 285 | 3685 |
| 277 | 3643 | 289 | 3685 |
| 281 | 3643 | 293 | 3685 |

Продукты растительного происхождения. Зависимость удельной теплоемкости яблок от температуры дана в табл. 1.22, томатов — в табл. 1.23, а

персиков — в табл. 1.24, причем в табл. 1.22—1.24 в удельную теплоемкость включена теплота кристаллизации воды.

Таблица 1.22 – Зависимость удельной теплоемкости яблок от температуры при нагреве от 293 до 363 К

| Сорт | Предварительная обработка | c , Дж/(кг · К) |
|------------------|---------------------------|-------------------|
| Ранет Симиренко | Отсутствует | 3193 |
| | Бланширование | 3520 |
| Бельфлер-китайка | Отсутствует | 3788 |
| | Бланширование | 3820 |

Таблица 1.23 – Зависимость удельной теплоемкости томатов от температуры при $T < T_{кр}$ ($w = 0,948$)

| T , К | c , Дж/(кг · К) | T , К | c , Дж/(кг · К) |
|---------|-------------------|-----------|-------------------|
| 233 | 1675 | 255 | 2596 |
| 238 | 1800 | 261 | 3308 |
| 244 | 1968 | 266 | 4815 |
| 250 | 2177 | 271...273 | 3684 |

Таблица 1.24 – Зависимость удельной теплоемкости плодов персиков от температуры при $T < T_{кр}$ ($w = 0,896$)

| T , К | c , Дж/(кг · К) | T , К | c , Дж/(кг · К) |
|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 233 | 1717 | 250 | 2590 |
| 238 | 1926 | 255 | 3224 |
| 244 | 2219 | 261 | 4271 |
| | | 266 | 4704 |

1.5 Тепло- и температуропроводность пищевых продуктов

1.5.1 Коэффициент теплопроводности

Основные сведения. Коэффициент теплопроводности λ [Дж/(с · м · К) или Вт/(м · К)], часто называемый теплопроводностью, характеризует теплопроводящие свойства продукта, а его значение определяется количеством теплоты, проходящей через единицу площади поверхности продукта в единицу времени при градиенте температуры, равном единице:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad } T} . \quad (1.23)$$

В отличие от рассмотренных плотности, удельной и объемной теплоемкости тепло- и температуропроводность не подчиняются закону аддитивности. Тепло- и температуропроводность смеси отнюдь не определены однозначно заданием теплофизических характеристик компонентов — они существенно зависят от структуры смеси.

На рис. 1.4 показана типичная зависимость теплопроводности от температуры для Karlsruhe food simulator, которая аналогична зависимости теплоемкости от температуры, показанной на рис. 1.3. Точно так же сильно изменяется теплопроводность в области вымораживания воды (0...-30 °С), где λ возрастает в 4 раза: от $\lambda_H = 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ при криоскопической температуре до $\lambda = 1,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ при —30 °С. В остальных интервалах температуры теплопроводность изменяется достаточно медленно. Именно в области положительных температур теплопроводность растет с температурой, увеличиваясь в среднем на 0,1 Вт/(м · К) на каждые 30 °С повышения температуры. В области же отрицательных температур (ниже - 30 °С) теплопроводность, напротив, понижается с температурой в среднем на 0,1 Вт/(м · К) на каждые 10 °С повышения температуры. Таким образом, теплопроводность замороженного продукта примерно в три раза сильнее зависит от температуры, чем незамороженного. Это связано с изменением теплопроводности льда, зависимость которой от температуры может быть описана приближенным выражением:

$$\lambda_l = 2,22 - 0,033t, \quad (1.24)$$

В холодильной технологии используют ряд приближенных выражений для зависимости теплопроводности продукта от температуры. Вывод этих выражений опирается на тот факт, что замороженный продукт представляет собой смесь дискретной фазы — микрокристаллов льда — с непрерывной,

незамороженной фазой. При этом можно полагать, что теплопроводность незамороженной фазы λ_n равна теплопроводности незамороженного продукта при криоскопической температуре, а теплопроводность дискретной фазы λ равна теплопроводности продукта при эвтектической температуре.

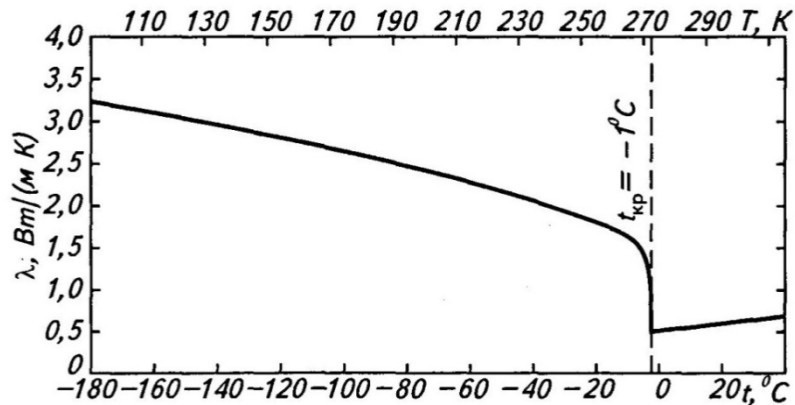


Рисунок 1.4 – Зависимость теплопроводности от температуры для Karlsruhe food simulator (гель метилгидроэтилцеллюлозы, содержащей 77% воды и 23% сухой субстанции).

В конкретных расчетах чаще всего используют выражение, известное как формула Эйкена:

$$\lambda(t) = \lambda_n \left\{ 1 - \frac{3 \omega(t)(\lambda_n - \lambda)}{3\lambda_n - 1(1 - \omega(t))(\lambda_n - \lambda)} \right\}, \quad (1.25)$$

Кроме того, предложен ряд эмпирических зависимостей. Зависимость теплопроводности мороженных продуктов λ_m от t может быть представлена в виде

$$\lambda_M - \lambda_{max} - \frac{t_{kp}}{t} \Delta\lambda, \quad (1.26.)$$

Где λ_{max} -теплопроводность при $\omega = 1$; $\Delta\lambda$ -изменение теплопроводности в интервале температур от t_{kp} до температуры, соответствующей завершению льдообразования.

Подобно эмпирической зависимости c_ω от t получена зависимость λ_m от t :

$$\lambda_m = m + \frac{n}{t}, \quad (1.27)$$

а также зависимость λ_m от t для замороженных продуктов различной влажности:

$$\lambda_m = 1,74 w \left(1 - \frac{t_{kp}}{t}\right) + 0,23, \quad (1.28)$$

Говядина. Теплопроводность говядины характеризуется данными табл. 1.25-1.28.

Таблица 1.25 – Зависимость коэффициента теплопроводности говядины от технологических параметров

| Направление теплового потока | T, K | $w, \text{кг/кг}$ | \mathcal{J} | $\Gamma^* \cdot 10^6$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ |
|----------------------------------|-----------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Перпендикулярное | 280...281 | 0,789 | 0,008 | 25 | 1066 | 0,48 |
| Параллельное | | 0,787 | 0,014 | 25 | 1064 | 0,43 |
| Перпендикулярное | 333...335 | 0,789 | 0,008 | 25 | 1032 | 0,48 |
| Параллельное | | 0,787 | 0,014 | 25 | 1031 | 0,44 |
| Перпендикулярное | 314...315 | 0,750 | 0,021 | 20 | 1059 | 0,48 |
| Параллельное | | 0,750 | 0,021 | 20 | 1059 | 0,43 |
| Перпендикулярное | 275...276 | 0,74 | 0,034 | — | — | 0,46 |
| Параллельное | | 0,765 | 0,023 | — | — | 0,40 |
| * Γ — массовая доля газа. | | | | | | |

Таблица 1.26 – Зависимость коэффициента теплопроводности говядины от влажности

| $w, \text{кг/кг}$ | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | $w, \text{кг/кг}$ | $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ |
|-------------------|---|-------------------|---|
| 0,70 | 0,472 | 0,30 | 0,300 |
| 0,60 | 0,444 | 0,20 | 0,187 |
| 0,50 | 0,422 | 0,10 | 0,120 |
| 0,40 | 0,367 | - | - |

Таблица 1.27 – Зависимость коэффициента теплопроводности [Вт/(м · К)] говядины от температуры при $T > T_{kp}$

| Сорт | $\rho, \text{кг/м}^3$ | Температура T, K | | | | | | | |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 303...308 | 308...313 | 313...318 | 318...323 | 323...328 | 328...333 | 333...338 | 338...343 |
| Высший | 1062 | 0,442 | 0,436 | 0,435 | 0,443 | 0,458 | 0,470 | 0,484 | 0,510 |

| | | | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I | 1087 | 0,476 | 0,453 | 0,449 | 0,452 | 0,477 | 0,562 | 0,526 | 0,558 |
| II | 1078 | 0,442 | 0,415 | 0,385 | 0,363 | 0,355 | 0,353 | 0,371 | 0,408 |

Таблица 1.28 – Зависимость коэффициента теплопроводности [Вт/(м · К)] говядины от температуры при $T < T_{кр}$

| Направление теплового потока | Температура, К | | | | | | |
|------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 238 | 243 | 248 | 253 | 258 | 263 | 268 |
| Параллельное | 1,53 | 1,50 | 1,49 | 1,44 | 1,35 | 1,32 | 1,09 |
| Перпендикулярное | 1,43 | 1,40 | 1,39 | 1,37 | 1,32 | 1,25 | 1,00 |

Колбасные изделия. Значения коэффициента теплопроводности колбасных изделий приведены в табл. 1.29.

Свинина. Зависимость коэффициента теплопроводности свинины от влажности при $T > T_{кр}$ и $T < T_{кр}$ дана в табл. 1.30.

Рыба. Коэффициент теплопроводности рыбы зависит от температуры (табл. 1.31) и от направления теплового потока (табл. 1.32).

Продукты растительного происхождения. Значения коэффициентов теплопроводности растительных продуктов даны в табл. 1.33 и 1.34.

Таблица 1.29 – Коэффициент теплопроводности [Вт/(м · К)] фарша колбасных изделий

| Фарш колбасы | w, кг/кг | T, К | | Фарш сосисок | w, кг/кг | T, К | |
|--------------|----------|------|------|--------------|----------|------|------|
| | | 293 | 343 | | | 293 | 343 |
| Ветчинной | 0,637 | 0,43 | 0,68 | Празских | 0,563 | 0,41 | 0,63 |
| Празской | 0,511 | 0,42 | 0,58 | Диетических | 0,627 | 0,41 | 0,66 |
| Охотничьей | 0,587 | 0,39 | 0,57 | Дебреценских | 0,549 | 0,43 | 0,66 |
| Польской | 0,446 | 0,37 | 0,57 | Шпекачек | 0,523 | 0,38 | 0,59 |
| Туристской | 0,554 | 0,43 | 0,65 | | | | |

Таблица 1.30 – Зависимость коэффициента теплопроводности свинины от влажности

| Влажность w, кг/кг | Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) |
|--------------------|--|
| 1 | 2 |
| При $T > T_{кр}$ | |

| | |
|------|-------|
| 0,39 | 0,386 |
| 0,45 | 0,407 |

Продолжение таблицы 1.30

| | |
|------------------|-------|
| 1 | 2 |
| 0,57 | 0,446 |
| При $T < T_{кр}$ | |
| 0,39 | 0,99 |
| 0,45 | 1,109 |
| 0,57 | 1,330 |

Таблица 1.31 – Зависимость коэффициента теплопроводности трески от температуры при $T > T_{кр}$ и $T < T_{кр}$

| Температура T , К | λ , Вт/(м · К) |
|---------------------|------------------------|
| 273...276 | 0,43...0,55 |
| 269 | 1,23...1,6 |
| 263...264 | 1,22...1,68 |
| 253 | 1,37...1,84 |

Таблица 1.32 – Коэффициент теплопроводности [$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м · К)] трески ($w = 0,76$) при $\rho = 1050$ кг/м³

| Продукт | Направление теплового потока | Температура T , К | | | | | | | | |
|---------|------------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 293 | 303 | 313 | 323 | 333 | 343 | 353 | 363 | 373 |
| Мясо | Параллельно волокнам | 500 | 513 | 520 | 531 | 530 | 531 | 534 | 535 | 536 |
| | Перпендикулярно волокнам | 470 | 472 | 476 | 479 | 480 | 484 | 485 | 487 | 490 |
| Филе | | 477 | 481 | 486 | 490 | 492 | 494 | 495 | 497 | 498 |

Таблица 1.33 – Коэффициент теплопроводности яблок при нагреве от 293 до 363 К

| Сорт | Предварительная обработка | ρ_f , кг/м ³ | λ , Вт/(м·К) |
|------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------|
| Ранет Симиренко | Отсутствует | 840 | 0,46 |
| | Бланширование | 924 | 0,47 |
| Бельфлер-китайка | Отсутствует | 804 | 0,45 |

| | | | |
|--|---------------|-----|------|
| | Бланширование | 897 | 0,45 |
|--|---------------|-----|------|

Таблица 1.34 – Коэффициент теплопроводности замороженных растительных продуктов

| Продукт | T, K | $\rho_{\phi},$ кг/м ³ | $\lambda,$ Вт/(м·К) |
|---|-----------|-------------------------------------|------------------------|
| Картофель | 200 | 977 | 1,09 |
| Горох | 253 | — | 0,502 |
| Морковь: | | | |
| корнеплод очищенный, ошпаренный кипятком (до замораживания), целый | 298 | 630 | 0,624 |
| корнеплод очищенный, ошпаренный кипятком (до замораживания), нарезанный ломтиками | 298 | 640 | 0,670 |
| Клубника смешанного размера, | 263 | — | 1,09 |
| плотно уложенная: | 253 | — | 1,14 |
| Слива: | | | |
| мелкая, твердая, сухая | 260...255 | 570 | 0,30 |
| крупная, плотно упакованная | 259...254 | 610 | 0,24 |

1.5.2. Коэффициент температуропроводности

Коэффициент температуропроводности α (м²/с) характеризует теплоинерционные свойства тела (т. е. его способность нагреваться или охлаждаться) и интенсивность этих процессов.

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов до начала льдообразования a_0 так же, как и ρ , c , λ , слабо зависит от температуры и может быть принят величиной постоянной. С началом льдообразования температуропроводность резко меняется, так как одновременно уменьшается теплоемкость и увеличивается теплопроводность.

Соответственно удельной c и полной удельной c_{ω} теплоемкостям коэффициент температуропроводности можно представить в виде коэффициентов температуропроводности a и a_{ω} :

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} ; a_{\omega} = \frac{\lambda}{c_{\omega}\rho}, \quad (1.29)$$

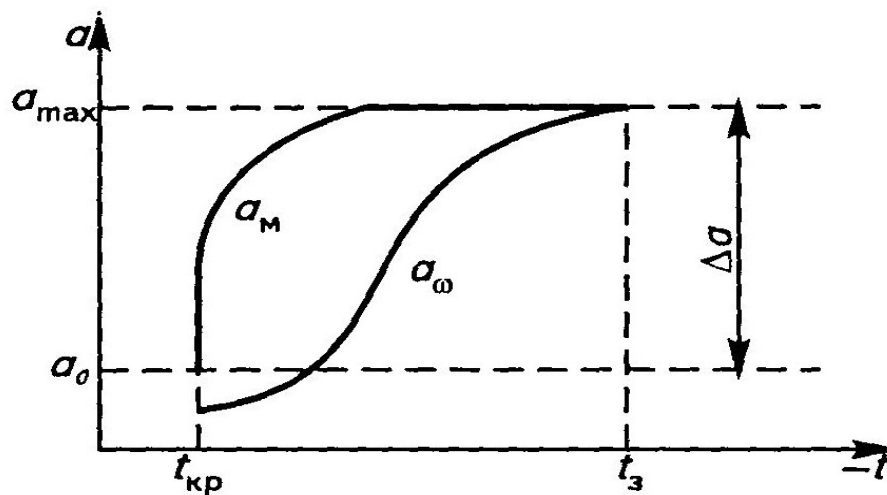


Рисунок 1.5 - Зависимость расчетного a и полного a_ω коэффициентов температуропроводности от температуры t .

При криоскопической температуре значение a_ω намного меньше значения a . Качественный характер зависимости a и a_ω от температуры представлен на рис. 1.5.

Некоторые теплофизические характеристики свежего растительного сырья приведены в табл.1.35.

Таблица 1.35 – Теплофизические характеристики свежего растительного сырья

| Сырье | w , кг/кг | ρ_ϕ , кг/м ³ | c , Дж/(кг·К) | λ , Вт/(м·К) | $a \cdot 10^8$, м ² /с |
|-------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|
| Картофель: | | | | | |
| Приекульский | 0,794 | 1066 | 3610 | 0,44 | п,з |
| Невский | 0,818 | 1068 | 3680 | 0,42 | 10,8 |
| Арина | 0,822 | 1062 | 3690 | 0,45 | 11,6 |
| Гатчинский | 0,832 | 1060 | 3720 | 0,43 | 10,9 |
| Домодедовский | 0,846 | 1017 | 3760 | 0,44 | 10,9 |
| Весна | 0,850 | 1058 | 3770 | 0,48 | 11,9 |
| Свекла: | | | | | |
| средние корнеплоды | 0,871 | 1050 | 3830 | 0,48 | 11,9 |
| крупные ($d = 100$ мм) | 0,766 | 1067 | 3530 | 0,535 | 14,2 |
| мелкие ($d = 70$ мм) | 0,768 | 1083 | 3590 | 0,490 | 12,6 |
| Морковь: | | | | | |

| | | | | | |
|----------------------|-------|------|------|-------|------|
| Нантская | 0,874 | 1031 | 3840 | 0,440 | 11,2 |
| Гардуолес | 0,881 | 1034 | 3860 | 0,475 | 11,9 |
| НИИОХ 336 | 0,881 | 1034 | 3860 | 0,455 | 11,4 |
| Консервная | 0,885 | 1032 | 3870 | 0,460 | 11,6 |
| Шантенэ 2461 | 0,885 | 1026 | 3870 | 0,465 | 11,7 |
| Лосиноостровская | 0,902 | 1022 | 3920 | 0,500 | 12,5 |
| Капуста белокочанная | 0,915 | 702 | 3970 | 0,34 | 12,2 |
| Томаты | 0,942 | 1023 | 4020 | 0,57 | 13,9 |
| | 0,947 | 990 | 3980 | 0,55 | 13,9 |
| | — | 1064 | 4000 | 0,51 | 12,0 |
| | 0,880 | 999 | 3745 | 0,52 | 13,9 |
| Перец | 0,920 | 1007 | 3960 | 0,47 | 11,8 |
| Горох: | | | | | |
| сухое вещество | 0 | 774 | 1234 | 0,129 | 13,5 |
| семя | 0,114 | 1360 | 1678 | 0,303 | 13,3 |
| слой семян | 0,100 | 814 | 1818 | 0,17 | 12,0 |
| Яблоки | 0,848 | 919 | 3760 | 0,43 | 12,4 |
| | 0,849 | 840 | 3762 | 0,513 | 16,2 |
| | 0,849 | 878 | 3768 | 0,415 | 12,6 |
| | 0,849 | 879 | 3768 | 0,42 | 12,5 |
| | 0,851 | 820 | 3726 | 0,51 | 16,7 |
| | 0,851 | 835 | 3730 | 0,37 | 11,9 |
| | 0,853 | 889 | 3768 | 0,42 | 12,5 |
| | 0,858 | 829 | 3580 | 0,40 | 13,4 |
| | 0,865 | 806 | 3810 | 0,42 | 14,3 |

1.6 Теплота дыхания и температурный коэффициент скорости дыхания картофеля, плодов и овощей

Большое значение придается такому показателю, как удельная теплота дыхания сырья, которая должна быть положена в основу всех теплофизических расчетов охлаждающих систем хранилищ растительной продукции. Теплоту дыхания можно рассчитать по интенсивности выделения диоксида углерода плодами и овощами.

Для расчетов можно пользоваться уравнением:

$$q = 2g', \quad (1.30)$$

где q - удельная теплота дыхания, Вт/т;

g' - количество диоксида углерода, выделяемого 1 кг сырья в течение 1 ч, мг.

Дыхание — процесс окисления, главным образом углеводов. Интенсивность его растет с увеличением температуры по следующему соотношению:

$$q = q_0 e^{bt}, \quad (1.31)$$

где q_0 - теплота дыхания при 0 °С, Вт/т; b - температурный коэффициент скорости дыхания, 1/°С (табл. 1. q_0 36).

Таблица 1.36 – Значения q_0 и b

| Сырье | Теплота дыхания q_0 при 0 °С, Вт/т | Температурный коэффициент скорости дыхания b , 1/°С | Теплота дыхания q , (Вт/т), при температуре, °С | | | | |
|------------------------------|---|---|---|-------|-------|--------|--------|
| | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Апельсины | 10,6 | 0,0733 | 15,3 | 22,0 | 31,8 | 45,8 | 66,1 |
| Бананы | 21,3 | 0,0782 | 31,5 | 46,5 | 68,8 | 101,7 | 150,4 |
| Бобы | 72,3 | 0,1023 | 120,7 | 101,2 | 335,6 | 559,8 | 933,2 |
| Виноград | 13,8 | 0,1277 | 26,2 | 49,6 | 94,0 | 178,0 | 337,0 |
| Вишня | 17,3 | 0,1338 | 33,8 | 66,0 | 128,9 | 251,6 | 491,4 |
| Горошек зеленый | 113,3 | 0,0852 | 173,4 | 265,5 | 406,5 | 622,6 | 953,3 |
| Груши | 9,5 | 0,1675 | 22,0 | 50,9 | 117,7 | 271,8 | 628,1 |
| Дыни | 15,2 | 0,1215 | 28,0 | 51,4 | 94,3 | 173,1 | 317,7 |
| Земляника | 45,0 | 0,0942 | 72,1 | 115,1 | 184,9 | 296,2 | 474,4 |
| Капуста: | | | | | | | |
| белокочанная | 14,5 | 0,0778 | 21,4 | 31,6 | 48,1 | 68,9 | 101,7 |
| цветная | 47,5 | 0,1004 | 78,4 | 129,5 | 214,0 | 353,5 | 583,6 |
| Картофель | 10,0 | 0,0617 | 13,6 | 18,5 | 25,2 | 34,4 | 46,8 |
| Клюква | 8,0 | 0,0605 | 10,9 | 14,7 | 19,9 | 26,9 | 36,4 |
| Кукуруза в початках столовая | 85,1 | 0,0884 | 132,5 | 206,0 | 320,6 | 498,8 | 776,0 |
| Лимоны | 11,2 | 0,0718 | 16,0 | 22,9 | 32,8 | 46,9 | 67,2 |
| Лук репчатый | 11,0 | 0,0668 | 15,4 | 21,6 | 30,1 | 42,0 | 58,7 |
| Малина | 74,0 | 0,1345 | 144,9 | 283,9 | 556,2 | 1089,5 | 2134,7 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Морковь | 13,5 | 0,1319 | 26,1 | 50,4 | 97,6 | 188,6 | 364,9 |
| Огурцы | 19,7 | 0,1187 | 35,6 | 64,4 | 116,6 | 211,1 | 382,3 |
| Перец сладкий | 36,8 | 0,0688 | 51,9 | 73,0 | 103,2 | 145,5 | 205,3 |
| Персики | 23,6 | 0,1139 | 41,7 | 73,8 | 130,3 | 230,4 | 407,3 |
| Свекла красная | 19,5 | 0,0717 | 28,0 | 40,0 | 57,3 | 82,0 | 117,3 |
| Сельдерей | 20,0 | 0,1014 | 33,2 | 55,2 | 91,6 | 152,0 | 252,4 |
| Сливы | 18,8 | 0,1149 | 33,5 | 59,4 | 105,6 | 187,5 | 333,1 |
| Смородина черная | 27,4 | 0,1903 | 71,1 | 184,1 | 476,8 | 1234,6 | 3197,6 |
| Томаты | 11,0 | 0,1144 | 19,6 | 34,7 | 61,5 | 108,9 | 192,9 |
| Шпинат | 56,1 | 0,1346 | 109,9 | 215,4 | 422,2 | 827,4 | 1622,3 |
| Яблоки | 12,1 | 0,0932 | 19,3 | 30,7 | 48,9 | 78,0 | 124,3 |

1.7 Примеры решения задач

Пример 1. Рассчитать теоретические значения доли вымороженной воды в тощей говядине при $t = -5$; -10 ; -15 и -20 °С. Полученные значения сравнить с экспериментальными данными из табл. 1.2 и оценить точность формулы (1.2). Провести расчет для двух случаев: когда вся вода считается способной к вымораживанию и когда 12 % воды считается связанной. Криоскопическая температура $t_{кр} = -0,8$ °С.

Решение. В первом случае считаем непосредственно по формуле (1.2):

при $t = -5$ °С

$$\omega = 1 - \frac{-0,8}{-5} = 0,84;$$

при $t = -10$ °С

$$\omega = 1 - \frac{-0,8}{-10} = 0,92;$$

при $t = -15$ °С

$$\omega = 1 - \frac{-0,8}{-15} = 0,95;$$

при $t = -20$ °С

$$\omega = 1 - \frac{-0,8}{-20} = 0,96.$$

Из сравнения полученных результатов с данными табл. 1.2 (согласно которым имеем, соответственно, $\omega = 0,74; 0,82; 0,85$ и $0,87$) видно существенное их различие - реально вымерзает заметно меньшая доля воды, так как в расчетах не учтено, что 12 % влаги является связанной, т. е. не вымораживается ни при какой температуре. Чтобы это учесть, надо полученные нами теоретические значения умножить

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

Тогда:

$$\text{при } t = -5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \omega = 0,84 \cdot 0,88 = 0,74;$$

$$\text{при } t = -10 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \omega = 0,92 \cdot 0,88 = 0,81;$$

$$\text{при } t = -15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \omega = 0,95 \cdot 0,88 = 0,83;$$

$$\text{при } t = -20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \omega = 0,96 \cdot 0,88 = 0,84.$$

Эти значения гораздо лучше согласуются с экспериментальными данными. Видно, что для температур до $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ получаются очень точные значения, а при более низких температурах формула (1.2) преувеличивает долю оставшейся невымороженной воды. Погрешность в значении ω составляет не более 3 %.

Пример 2. Замораживается филе морского окуня от начальной температуры $t_{\text{нач}} = 20^{\circ}\text{C}$ до конечной $t_{\text{кон}} = -18 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Оценить количество теплоты, которое необходимо отвести от 1 кг продукта. Криоскопическая температура для морской рыбы $t_{\text{кр}} = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; влажность $w = 0,8$; доля незамерзающей воды 0,4; удельная теплоемкость незамороженного филе $c_n = 3500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, замороженного - $c = 1800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Решение. Теплота, отводимая от незамороженного филе:

$$Q_1 = c_n(t_{\text{нач}} - t_{\text{кр}}) = 3500 \cdot (20 - (-2)) = 77000 \text{ Дж/кг.}$$

Доля вымороженной воды

$$\omega = (1 - 0,4) \cdot \left(1 - \frac{-2}{-18}\right) = 0,53.$$

Теплота кристаллизации воды

$$Q_2 = r w \omega = 330000 \cdot 0,8 \cdot 0,53 = 140000 \text{ Дж/кг.}$$

Теплота, отводимая от замороженной части,

$$Q_3 = c(t_{кр} - t_{кон}) = 1800 \cdot (-2 - (-18)) = 29000 \text{ Дж/кг.}$$

Суммарная теплота

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 246000 \text{ Дж/кг.}$$

Пример 3. Рассчитать коэффициент теплопроводности мяса трески при температурах $t = -30, -20, -10, -5$ и 0°C по формуле Эйкена. Результаты сравнить с данными табл. 1.31. Теплопроводность незамороженной трески при криоскопической температуре $t_{кр} = 1^\circ\text{C}$ составляет $\lambda_n = 0,55 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; теплопроводность полностью замороженного мяса $\lambda = 1,85 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Решение. Вначале по формуле (1.2) рассчитаем долю вымороженной воды:

при $t = -5^\circ\text{C}$

$$\omega = 1 - \frac{-1}{-5} = 0,8;$$

при $t = -10^\circ\text{C}$

$$\omega = 1 - \frac{-1}{-10} = 0,9;$$

при $t = -20^\circ\text{C}$

$$\omega = 1 - \frac{-1}{-20} = 0,95;$$

при $t = -30^\circ\text{C}$

$$\omega = 1 - \frac{-1}{-30} = 0,97.$$

Далее по формуле Эйкена (1.25) вычисляем теплопроводность:

при $t = -5^\circ\text{C}$

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

при $t = -10^\circ\text{C}$

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

при $t = -20^\circ\text{C}$

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

при $t = -30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\lambda = 0,55 \left(1 - \frac{3 \cdot 0,97 \cdot (0,55 - 1,85)}{3 \cdot 0,55 \cdot (1 - 0,97) \cdot (0,55 - 1,85)} \right) = 1,78 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Согласно экспериментальным данным (табл. 1.31), теплопроводность трески при этих температурах составляет 1,44; 1,65; 1,83; 1,84 Вт/(м · К) соответственно. Видно, что для температур -5 и -10 °С наблюдается практически идеальное соответствие формулы Эйкена экспериментальным данным. При температурах же -20 и -30 °С эта формула дает слегка заниженное значение теплопроводности (впрочем, не более чем на 5 %). Причина та же, что и отмеченная в примере 1: соотношение для доли вымороженной воды становится неточным при очень низких температурах.

Пример 4. Рассчитать удельную теплоту дыхания q лимонов при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$, если экспериментально установлено, что выделение CO_2 в результате дыхания при $t = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 5,33 мг CO_2 (кг · ч), а при $t = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - 10,93 мг CO_2 (кг · ч).

Решение.

1. Рассчитаем удельную теплоту дыхания по соотношению (1.30):
 $q = 3 \cdot 5,33 = 16 \text{ Вт/т};$

$$q = 3 \cdot 10,93 = 32,8 \text{ Вт/т}.$$

2. Из уравнения (1.31) определим значения b и q_0 :

$$\begin{cases} 16 = q_0 e^{b \cdot 5}; \\ 32,8 = q_0 e^{b \cdot 15}. \end{cases}$$

Из решения системы найдем:

$$q_0 = 11,2 \text{ Вт/т}, \quad b = 0,072 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

и сравним с экспериментальными данными, представленными в табл. 1.36. Результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными значениями.

3. Рассчитаем удельную теплоту дыхания лимонов q при температуре 20 °С:

$$q = 11,2e^{0,072 \cdot 20} = 1,2e^{1,44} = 46,9 \text{ Вт/т.}$$

1.8 Контрольные задачи

1. Рассчитать удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 6 до -25 °С. По результатам расчетов построить график зависимости c и a от температуры t .

Необходимые для расчетов значения $t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и других параметров взять из справочников.

2. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для трески в интервале температур от 5 до -25 °С. По результатам расчетов построить график зависимости c и a от температуры t .

Необходимые для расчетов значения $t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и других параметров взять из справочников.

3. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ говядины при температуре -30 и -20 °С по формуле Эйкена. Теплопроводность мяса при криоскопической температуре взять из соответствующей таблицы.

4. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 8 до -20 °С и построить график (по результатам расчетов) зависимости их от температуры. Необходимые для расчетов значения характеристик взять из справочников.

5. Рассчитать удельную теплоемкость c_m и коэффициент температуропроводности a_m для говядины влажностью $w = 60...80 \%$ при температуре -20 °С. Построить график зависимости c_m и a_m от влажности w мяса. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ и др.) взять из справочной литературы.

6. Рассчитать значения теплопроводности λ тощей свинины при температурах -20 и -12 °C по формуле Эйкена. Теплопроводность тощей свинины при криоскопической температуре взять из соответствующей таблицы.

7. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 8 до -25 °C. По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры.

8. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ картофеля при температурах -10 и -18 °C по формуле Эйкена. Теплопроводность картофеля при криоскопической температуре взять из справочной литературы.

9. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ яблок сорта Ренет Симиренко при температурах -5 , -10 , -15 , -20 °C по формуле Эйкена. Теплопроводность при криоскопической температуре взять из справочной литературы.

10. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для моркови сорта Нантская в интервале температур от 10 до -20 °C. По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры t . Необходимые для расчета значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из табл. 1.35 и справочной литературы.

11. Рассчитать удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для белокочанной капусты в интервале температур от 5 до -15 °C. По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры t . Необходимые для расчета значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из табл. 1.35 и справочной литературы.

12. Вычислить удельную теплоемкость c_m и коэффициент температуропроводности a_m для персиков влажностью $w = 89,6$ % при температуре -18 °C. Построить график зависимости c_m и a_m от влажности w персиков. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из справочной литературы.

13. Рассчитать удельную теплоемкость c_m и коэффициент температуропроводности a_m для томатов с влажностью $w = 94,8$ % при температуре -18

°С. Построить график зависимости c_m и a_m от влажности w томатов. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из справочной литературы.

14. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ филе судака при температурах -5, -10, -20 и -30 °С по формуле Эйкена. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, λ_0 , λ_m) взять из справочной литературы.

15. Вычислить значения коэффициента теплопроводности λ неразделанного судака при температурах -20 и -30 °С по формуле Эйкена. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, λ_0 , λ_m) взять из справочной литературы.

16. Рассчитать удельную теплоту дыхания плодов q (Вт/т) при температурах 0, 5, 10, 15 и 20 °С, если из опытов установлено, что выделение газообразного диоксида углерода в результате дыхания при температуре $t_1 = 3$ °С составляет $z_1 = 5,8$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, а при температуре $t_2 = 16^\circ\text{C}$ выделение CO_2 равно $z_2 = 28$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$. Зависимость интенсивности тепловыделения от температуры представить графически в координатах $q=f(t)$. В расчетах принять, что при образовании 1 мг CO_2 выделяется 10,8 Дж теплоты. Полученные значения сравнить с экспериментальными значениями из табл. 1.36.

17. Вычислить удельную теплоту дыхания плодов q (Вт/т) при температурах 0, 5, 10, 15 и 20°С, если из опытов установлено, что выделение углекислого газа в результате дыхания z при температурах $t_1= 3^\circ\text{C}$ составляет $z_1= 5,2$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, при $t_2 = 17^\circ\text{C}$ составляет $z_2 = 31$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$. Результаты опытов и расчетов представить графически в координатах $q =f(t)$. В расчетах принять, что при образовании 1 мг CO_2 выделяется 10,8 Дж теплоты. Полученные значения сравнить с экспериментальными значениями из табл. 1.36.

18. Рассчитать удельную теплоту дыхания ягод (Вт/т) при температурах 0; 5; 10; 15 и 20 °С , если из опытов установлено, что выделение газообразного диоксида углерода в результате дыхания при температуре $t_1 = 6$ °С

составляет $z_1=8,2$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, а при температуре $t_2 = 18^\circ\text{C}$, $z_2=34$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$.

В расчетах принять, что при образовании 1 мг CO_2 выделяется 10,8 Дж теплоты. Результаты опытов и расчетов представить графически в координатах $q = f(t)$. Полученные значения сравнить с экспериментальными значениями из табл. 1.36.

19. Рассчитать удельную теплоту дыхания ягод q (Вт/т) при температурах 0; 5; 10; 15 и 20°C , если из опытов установлено, что выделение газообразного диоксида углерода в результате дыхания z при температуре $t_1 = 4^\circ\text{C}$ составляет $z_1=6,8$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, а при температуре $t_2 = 19^\circ\text{C}$, $z_2=36$ мг $\text{CO}_2/(\text{кг} \cdot \text{ч})$.

Построить график зависимости q от t по результатам опытов и расчетов. В расчете принять, что при образовании 1 мг CO_2 выделяется 10,8 Дж теплоты. Полученные значения сравнить с экспериментальными значениями из табл. 1.36.

20. Рассчитать удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 10 до -20°C . По результатам расчетов построить график зависимости c и a от температуры t .

Необходимые для расчетов значения $t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и других параметров взять из справочников.

21. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для трески в интервале температур от 7 до -30°C . По результатам расчетов построить график зависимости c и a от температуры t .

Необходимые для расчетов значения $t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и других параметров взять из справочников.

22. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ говядины при температуре -35 и -15°C по формуле Эйкена. Теплопроводность мяса при криоскопической температуре взять из соответствующей таблицы.

23. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 10 до -25°C и по

строить график (по результатам расчетов) зависимости их от температуры. Необходимые для расчетов значения характеристик взять из справочников.

24. Рассчитать удельную теплоемкость c_m и коэффициент температуропроводности a_m для говядины влажностью $w = 60...80 \%$ при температуре -25°C . Построить график зависимости c_m и a_m от влажности w мяса. Необходимые для расчетов значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ и др.) взять из справочной литературы.

25. Рассчитать значения теплопроводности λ тощей свинины при температурах -20 и -15°C по формуле Эйкена. Теплопроводность тощей свинины при криоскопической температуре взять из соответствующей таблицы.

26. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для говядины в интервале температур от 10 до -28°C . По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры.

27. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ картофеля при температурах -9 и -25°C по формуле Эйкена. Теплопроводность картофеля при криоскопической температуре взять из справочной литературы.

28. Рассчитать значения коэффициента теплопроводности λ яблок сорта Ренет Симиренко при температурах -7 , -11 , -15 , -19°C по формуле Эйкена. Теплопроводность при криоскопической температуре взять из справочной литературы.

29. Вычислить удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для моркови сорта Нантская в интервале температур от 8 до -25°C . По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры t . Необходимые для расчета значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из табл. 1.35 и справочной литературы.

30. Рассчитать удельную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a для белокочанной капусты в интервале температур от 5 до -20°C . По результатам расчетов построить графики зависимости c и a от температуры t . Необходимые для расчета значения ($t_{кр}$, w , p , c_0 , λ_0 и др.) взять из табл. 1.35 и справочной литературы.

