



А. С. Гамбург, М. А. Гринин, Г. В. Козлов

ОСНОВНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИЗМЕНЕНИЙ
В СОВЕТСКОМ
ПРОМЫСЛЕ

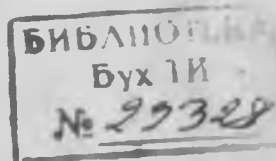
А. С. Гамбург, М. А. Гринин, Г. В. Козлов

1749
А. С. Гинзбург,
М. А. Громов.
Г. И. Красовская

ТЕПЛО - ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

СПРАВОЧНИК

Издание второе, дополненное
и переработанное



ББК 36
Г49
УДК 664.004.12:536.2 (083)

В справочнике приводятся систематизированные данные по теплофизическим характеристикам (ТФХ) основных видов пищевых продуктов. Для определения ТФХ предложены обобщенные формулы в зависимости от определяющих факторов: температуры, влажности, химического состава продуктов.

Методы определения характеристик классифицированы по типовым моделям строения пищевых продуктов.

В справочнике впервые приведены удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, плотность, насыпная плотность не только исходного сырья и готовых продуктов, но и продуктов на различных стадиях обработки (нагрев, охлаждение, сушка, выпечка и т. п.).

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников пищевой промышленности. Может быть использована также студентами вузов.

Рецензенты — д-р техн. наук, проф. О. Г. ЛУНИН и канд. техн. наук А. П. РЫСИН.

АБРАМ СОЛОМОНОВИЧ ГИНЗБУРГ
МИХАИЛ АРКАДЬЕВИЧ ГРОМОВ
ГАЛИНА ИВАНОВНА КРАСОВСКАЯ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Редактор Г. И. Круглова. Художник М. В. Носов
Художественный редактор В. А. Чуракова.
Технический редактор Г. Б. Жарова
Корректоры Т. Н. Бобрикова, М. А. Шегала

ИБ № 1133

Сдано в набор 17.03.80. Подписано в печать 27.08.80. Т-02948.
Формат 84×108¹/₁₆. Бумага книжно-журнальная. Литературная гарнитура.
Высокая печать. Объем 9 п. л. Усл. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 17,26.
Тираж 5500 экз. Заказ 360. Цена 1 р. 10 к.
Издательство «Пищевая промышленность» 113035, Москва, М-35,

при Государственном
и книжной торговли,

Г 31701—019
044(01)—80 19—80 2901000000

© Издательство «Пищевая
промышленность», 1975 г.
© Издательство «Пищевая
промышленность», 1980 г.,
с изменениями.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы проблема изучения теплофизических свойств и определения теплофизических характеристик различных материалов и продуктов получила дальнейшее развитие. Это нашло отражение в материалах, разработанных Научным советом по проблеме теплоперенос в технологических процессах¹ Госкомитета по науке и технике, в которых дано обобщение данных по вопросу и разработаны рекомендации по развитию проблемы². Некоторые итоги работ в этой области были подведены на VI Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ, состоявшейся в ноябре 1978 г. в Минске³, на которой были сделаны доклады и сообщения по теплофизическим свойствам твердых тел, жидкостей, газов и их смесей.

На основе анализа этих материалов можно констатировать, что, несмотря на значительные достижения в исследовании теплофизических свойств и определении характеристик различных веществ и материалов, в этой области еще имеется ряд нерешенных задач. К ним относятся, в частности, недостаточная точность измерений и особенно ограниченный объем теплофизических измерений фундаментального характера, отставание в обобщении накопленных экспериментальных данных и отсутствие четко разработанной обобщенной методической информации по результатам измерений; по-прежнему отмечается изобилие методов определения теплофизических характеристик, что в большой мере обусловлено отсутствием промышленного выпуска стандартной аппаратуры и соответствующих ГОСТов.

В этих материалах отмечена также актуальность обобщения результатов многочисленных исследований теплофизических свойств и измерений теплофизических характеристик в справочниках и монографиях. В свете приведенных выше данных следует рассматри-

¹ Научно-технический прогноз развития проблемы «Массо- и теплоперенос в технологических процессах» на 1970—1985 гг.; Основные направления развития теоретических и прикладных исследований в области массо- и теплопереноса в технологических процессах на 1977—1990 гг. Минск, 1977.

² VI Всесоюзная конференция г. Минск. Тезисы докладов. ИТМО А. эне..... Научный совет по комп. Минск, 1978, 211 с.

изическим свойствам
Институт ядерной
проблеме «Теплофизи-

вать и задачи изучения теплофизических свойств и определения теплофизических характеристик пищевых продуктов и материалов. Сырье, материалы и продукты пищевой промышленности представляют собой сложные объекты обработки: это обычно гетерогенные системы — твердые тела разнообразной структуры и жидкие растворы различной концентрации, в которых могут находиться и газовые включения. Такие объекты называют «смесями веществ», под которыми в широком смысле понимаются смеси газообразных, жидких, твердых тел и их композиций, а также твердые пористые (зернистые) системы с газовыми и жидкими включениями.

Трудности экспериментального определения теплофизических характеристик таких объектов обуславливают большое значение аналитических методов расчета коэффициентов в зависимости от состава, структуры и параметров состояния системы. При этом большое значение приобретает обоснованный выбор моделей структуры объектов и физических представлений, лежащих в основе выбранных методов измерений. Так, например, в зависимости от метода и скорости нагрева (охлаждения) объекта может изменяться его структура, а для влажных материалов большое значение может иметь взаимовлияние процессов переноса тепла (энергии) и массы (влаги), особенно при наличии фазовых превращений.

Таким образом, определение и оценку значений теплофизических характеристик материалов следует увязывать с другими свойствами и характеристиками, а также с методами их обработки в различных технологических процессах, т. е. определять реальные эффективные характеристики материалов.

За последние годы в периодической печати Советского Союза и зарубежных стран появилось большое количество статей (более 600), посвященных изучению теплофизических свойств пищевых продуктов, а также два специальных справочных пособия (в Румынии и США)¹, в которых приведены данные по теплофизическим характеристикам различных продуктов.

Во втором, значительно переработанном, дополненном издании настоящего справочника дается обобщение указанных работ, причем это обобщение базируется на современных теоретических представлениях о процессах переноса теплоты в гетерогенных системах и анализе методов определения их теплофизических характеристик.

Следует отметить, что в настоящее время в народном хозяйстве используется огромное количество материалов (одних твердых материалов — более 3 млн., и ежегодно число их увеличивается на сотни тысяч), и поэтому можно согласиться с Л. П. Филипповым (МГУ), что для изучения теплофизических свойств каждого продукта и материала не хватит ни сил, ни времени, ни средств². В связи с этим большое значение имеет объединение в группы материалов, однородных по физическим свойствам и структуре.

¹ Ch. M. Hiescu, Constante termofizice ale principalelor produse alimentare, 1971, «Editura tehnica», Bucuresti, 186 с.

Rha Chokyun, Thermal properties of food materials, 1975, Dordrecht — Boston, p. 312—352.

² Филиппов Л. П. Тепло- и массоперенос. — Труды IV Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену, т. 10, ч. II, Минск, 1974.

Указанные соображения полностью относятся и к пищевым продуктам и магерналам (сырью, полуфабрикатам и готовым изделиям), поэтому в I разделе справочника дается классификация пищевых материалов по теплофизическим свойствам и структурным характеристикам.

В этом же разделе приводится описание и анализ методов определения теплофизических характеристик, которые рассматриваются как показатели тепловых свойств объектов. Здесь же приводятся рекомендации по применению предпочтительных методов для определенных групп продуктов.

Во II разделе приводятся численные значения характеристик (в основном в виде таблиц), их анализ и там, где это возможно, — обобщение в виде эмпирических формул и сравнение с расчетными данными. В таблицах теплофизических характеристик в последней графе даны ссылки на литературный источник, в котором указано, какими методами определены эти характеристики. Описание методов и их анализ приведены в разделе I, причем предпочтение отдано наиболее современным методам и приборам.

Перечень пищевых продуктов и материалов по сравнению с I-м изданием значительно расширен, в частности приведены данные по следующим продуктам: крахмал, патока, глюкоза, инвертный сироп, мучные кондитерские изделия, пищевые концентраты, кофе, чай, спирт и его водные растворы, сахарные растворы, вино, коньяк, ликеры, пиво.

Важное значение имеет обоснованный отбор экспериментальных данных для обработки и обобщения в виде сводных таблиц или эмпирических формул. В этой работе авторы в основном придерживались принципов, рекомендуемых Госкомитетом СССР по стандартам для составления справочников, которые нашли, в частности, отражение в недавно изданном Государственной службой стандартных справочных данных справочнике по теплопроводности жидкостей и газов¹. В этом справочнике, в частности, отмечены наиболее важные тенденции развития экспериментальных методов исследования теплофизических характеристик:

комплексное исследование теплофизических свойств в одном эксперименте;

применение экспрессных методов;

миниатюризация измерительных датчиков (ячеек) и самих установок в целом;

использование систем автоматического сбора и обработки информации, а также автоматического управления экспериментом;

использование новых методов измерения и, в частности, косвенных методов исследования;

проведение прецизионных экспериментов на современном метрологическом уровне с целью создания эталонов для градуировки экспериментальных установок.

Авторы выражают искреннюю признательность д-ру техн. наук, проф. Л. Д. Буканову, д-ру техн. наук проф. О. Г. Лунину, канд. техн. наук А. П. Рысину за их труд по рецензированию рукописи.

¹ Теплопроводность жидкостей и газов/ [Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий]. — М., 1978. — 472 с.

Предисловие и введение написаны А. С. Гинзбургом; раздел I — Г. И. Красовской; подразделы 1, 2, 3, 4, 8, 12 раздела II — М. А. Громовым, подразделы 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13 — А. С. Гинзбургом и М. А. Громовым.

ВВЕДЕНИЕ

Для эпохи научно-технической революции характерно сочетание глубокого познания законов природы с использованием их для нужд человека — в технике и, в частности, в различных технологических процессах, связанных с обработкой сырья — продуктов природы, полуфабрикатов и готовых изделий. Рациональное использование достижений науки на практике требует знания свойств различных материалов и продуктов, которые подвергаются хранению, технологической обработке и использованию. Среди этих свойств важное место занимают теплофизические свойства и их количественные характеристики, так как тепловая обработка широко применяется в народном хозяйстве и, в частности, в пищевой промышленности. Развитие, совершенствование и интенсификация процессов тепловой обработки базируются на основных принципах современной технологии: от знания и анализа теплофизических свойств материалов (продуктов) как объектов обработки — к выбору методов и оптимальных режимов процесса и на этой основе — к созданию рациональной конструкции аппаратов.

Вместе с тем современная наука решает и обратную задачу — разработку способов прогнозирования свойств с целью получения конечных продуктов с заранее заданными теплофизическими характеристиками. Поэтому важное значение имеет характеристика структуры реальных объектов — пищевых продуктов как гетерогенных многокомпонентных систем (особенно в случае взаимопроникновения компонентов, как это происходит во влажных коллоидных пористых материалах) и разработка методов предвычисления их теплофизических характеристик.

Изложенные выше соображения характерны для современного этапа развития науки в области изучения теплофизических свойств и определения теплофизических характеристик различных материалов и продуктов.

Отсылая читателя к введению 1-го издания [20], в котором дан краткий исторический обзор развития исследований теплофизических свойств пищевых продуктов, рассмотрим основные тенденции, которые получили развитие за последние годы, и кратко остановимся на некоторых работах, проведенных в этой области.

Следуя А. В. Лыкову [14], отметим два основных направления в исследовании теплофизических свойств влажных капиллярно-пористых тел и дисперсных сред, а также жидких систем.

Первое (традиционное) направление — экспериментальное определение теплофизических характеристик известными методами, базирующимися на решении краевых задач теплопроводности. К ним по-прежнему относятся классические методы: стационарного плоского одномерного потока для измерения коэффициента теплопроводности; температурных волн в стержне для измерения коэффициента температуропроводности; смешения и периодического ввода тепла для измерений энthalпии и теплоемкости; регулярного режима.

Наряду с этим в экспериментальных исследованиях широко применяются новые методы, базирующиеся на закономерностях различных нестационарных тепловых режимов.

Важное значение имеет правильная постановка эксперимента и оценка погрешности определения теплофизических характеристик

10.

Второе направление — аналитическое определение теплофизических характеристик на основе теоретических представлений о механизме переноса теплоты в модельных структурах, характерных для реальных твердых тел и дисперсных систем, или с учетом концентрации и степени ассоциации жидких систем.

В последнее время широко развиваются теоретические исследования, базирующиеся на принципе обобщенной проводимости. В основе этого принципа лежит аналогия между дифференциальными уравнениями стационарного потока теплоты, электрического тока, электрической и магнитной индукции, а также потока массы, вследствие чего для расчета теплопроводности применяют основные соотношения электростатики и электродинамики и на их основе получают формулы для расчета эффективных коэффициентов обобщенной проводимости (теплопроводности, электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости, вязкости, диффузии и др.). Такие исследования проводятся Г. Н. Дульневым с сотрудниками. Ими, в частности, предложен новый метод расчета проводимости гетерогенных (авторы называют их «составными») тел при резком различии свойств составляющих их компонентов [8—10].

Практическое значение имеет постановка задачи определения аналитического вида функции, связывающей эффективные коэффициенты обобщенной проводимости гетерогенных систем с коэффициентами проводимости составляющих их отдельных компонентов и их объемными концентрациями.

Некоторые авторы для исследования теплофизических свойств применяют методы решения обратных задач теплообмена¹, которые рассматривают теплообмен твердого тела с окружающей средой как «причину — следствие»: причиной являются краевые условия, теплофизические характеристики, внутренние источники тепла и др., а также геометрические характеристики системы, а следствием — тепловые состояния и параметры (например, температурное поле) исследуемого объекта. По информации о тепловом состоянии восстанавливаются причинные теплофизические характеристики.

В последнее время для теоретического исследования теплофизических свойств применяют термодинамическую теорию, которая более строго описывает конечные результаты явления теплопроводности, чем классическая теория, исходящая из бесконечной скорости распространения теплоты [11].

Модельные структуры влажных твердых пористых тел для определения теплофизических характеристик предложены разными авторами: А. Ф. Чудновским [23], О. Кришером — ФРГ [13], А. Миснаром — Франция [16], Г. Н. Дульневым и др. Эти модели, естественно, не могут точно отражать структуру реальных тел, и поэтому расчеты по теоретическим формулам являются в определенной мере

¹ См. Материалы II Всесоюзного семинара по обратным задачам теплообмена. — М.: МАИ. — 1976.

приближенными. Однако большое значение эти расчеты имеют для прогнозирования теплофизических свойств, о чем упоминалось выше.

Поэтому наиболее эффективным является сочетание обоих направлений определения теплофизических характеристик — теоретического и экспериментального.

Специфические особенности имеет определение теплофизических характеристик дисперсных продуктов, омываемых газовой средой, что имеет большое практическое значение для анализа процессов термической обработки пищевых продуктов в псевдооживленном (аэро- и аэровиброкипящем) слое и во взвешенном состоянии. Речь идет об определении эффективных теплофизических характеристик многофазной системы по известным характеристикам отдельных фаз (твердых частиц и газа) и структуре (состоянию слоя) системы.

Теоретические исследования такой задачи проведены Ю. А. Бувинчем и Ю. А. Корисевым [2] при малых значениях числа Пекле, характеризующего конвективный перенос тепла внутри и вне отдельной частицы материала. Очевидно, такое ограничение относится к сравнительно небольшим скоростям газовой среды, т. е. при малых значениях числа псевдооживления.

Одним из первых исследований по теоретическому определению теплоемкости пищевых продуктов была работа В. Э. Водогинского, который предложил определять теплофизические характеристики сложных по составу продуктов расчетом по значениям теплоемкости входящих в них органических соединений, минеральных веществ и воды [4]. При этом он исходил из закона Дюлонга и Пти, согласно которому атомная теплоемкость химических элементов (за некоторым исключением) приближенно может быть принята равной $3R$, и из закона Коппа — Неймана, по которому молярная теплоемкость химического соединения равна сумме атомных теплоемкостей элементов, составляющих соединение (закон аддитивности).

Уравнения аддитивности были применены позднее С. М. Скуратовым (для крахмала) и В. З. Жаданом (для овощей).

А. С. Гинзбург для расчета теплофизических характеристик теста-хлеба применил упрощенную модель О. Криенера [5, 6].

Для расчета теплофизических характеристик жидких систем можно применить результаты исследований А. С. Предводителя [18], Н. Б. Варгафтика [3], а также Л. П. Филиппова [21, 22].

На основе анализа, проведенного М. А. Громовым, коэффициент теплопроводности жидких пищевых продуктов и материалов в зависимости от температуры рекомендуется рассчитывать по теоретической формуле Предводителя — Варгафтика, предназначенной авторами для расчета $\lambda = f(T)$ химически чистых ассоциированных и неассоциированных однородных жидкостей.

К ассоциированным относятся жидкости, тепловая обработка которых связана с затратой только удельной теплоты испарения r , а к неассоциированным — жидкости, при термической обработке которых затрачивается не только удельная теплота испарения r , но и дополнительное количество энергии на разрыв молекулярных связей.

Здесь уместно также напомнить, что, как показал П. А. Ребиндер, при термической обработке (сушка и другие процессы) многих влажных коллоидных капиллярно-пористых материалов в области удаления адсорбционно-связанной влаги (и особенно влаги мономо-

молекулярного слоя) расход энергии превышает величину r в связи с необходимостью преодоления адсорбционных сил [19].

Расчет энергии связи проводится по термодинамической формуле, на основании которой нами построена расчетная номограмма [6], или на основе данных специально проведенных экспериментов.

Применительно к жидким пищевым продуктам и материалам формула Предводителяева — Варгафтика имеет вид

$$\lambda_T = \frac{B}{\alpha_T} \rho_T, \quad (1)$$

где λ_T — коэффициент теплопроводности жидких пищевых продуктов, Вт/(м·К);

B — постоянная, которая определяется видом жидкости и содержанием в ней сухих веществ (или концентрацией);

α_T — коэффициент, характеризующий степень ассоциации;

ρ_T — плотность, кг/м³.

Постоянная B в свою очередь равна

$$B = A_T c_T \rho^{1/3} M^{-1/3}, \quad (2)$$

где A_T — инвариант, он определяется температурой жидкости и не зависит от ее вида. При $T = 303$ К инвариант $A = 0,428 \cdot 10^{-3}$, если λ выражен в Вт/(м·К), а ρ — в г/см³;

c_T — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

M — молекулярная (истинная или кажущаяся) масса.

Индексы « T » означают, что λ , α , ρ , A и c взяты при одной и той же температуре.

Коэффициент α равен: для растительных масел 1,00; для этилового спирта 1,29; для жидкостей, содержащих воду (в том числе вина и пива), он принимается как α воды (табл. 1); коэффициент α воды при $T = 273$ К в соответствии с формулой Трутона равен 1,240. При других температурах он определяется по формуле

$$\alpha_T = \alpha_{273} \frac{\lambda_{273}}{\lambda_T} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{273}}, \quad (3)$$

Таблица 1

Расчетные значения α воды

T, K	273	283	293	303	313	323	333	343	353	363	373
α	1,240	1,196	1,16	1,129	1,098	1,0711	0,50	1,025	1,008	0,991	0,972

Инвариант A при различных температурах рассчитывается по формуле

$$A_T = \frac{A_{303} c_{303} \rho_{303}^{1/3}}{c_T \rho_T^{1/3}}, \quad (4)$$

Для многих жидкостей $(\rho_{303}/\rho_T)^{1/2}$ незначительно отличается от единицы, поэтому формула (4) принимает вид

$$A_T = \frac{A_{303} c_{303}}{c_T} \quad (5)$$

Коэффициент теплопроводности неассоциированных жидкостей λ [в Вт/(м·К)] Л. П. Филиппов рекомендует определять по формуле

$$\lambda = 2,12v (c_p)^{2/3} k^{1/3} \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right)^{5/3} \quad (6)$$

где v — скорость звука;

c_p — удельная теплоемкость;

ρ — плотность;

k — постоянная Больцмана;

ρ_k — критическая плотность.

Результаты исследования коэффициента температуропроводности пищевых продуктов (яблочного мусса, томатов, картофельного пюре, бананов, сливы, земляники, яичного белка, рыбы, обезжиренного творога, говяжьих, окорока и глюкозы), проведенные Риделем, позволили рекомендовать обобщенную формулу для определения α (в м²/с) в зависимости от влажности W и температуры T :

$$\alpha \cdot 10^8 = 8,83 + 0,01WK, \quad (7)$$

где K — коэффициент, зависящий от температуры (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента K в формуле (7)

T, K	273	283	293	303	313	323	333	353	363	373
K	4,3	5,0	5,6	6,0	6,4	6,7	7,0	7,6	7,8	8,0

Формула справедлива для однородных материалов и пищевых продуктов без газовых включений при $W \geq 40\%$ и $T = 273 \div 373$ К.

В связи с тем, что в процессах термической обработки происходят изменения свойств продуктов и соответственные изменения их теплофизических характеристик, важное значение имеет разработка методов, позволяющих определять эти характеристики непосредственно в процессе обработки или при создании аналогичных условий с учетом налагающихся на теплообмен явлений (массообмен, фазовый переход, химические реакции и др.). К ним относятся, в частности, метод ИТМО АН БССР [15], метод, разработанный в МТИППе [17] и др.

В установке ИТМО применен нестационарный метод зонда постоянной мощности, теоретической основой которого является решение задачи теплопроводности при нагреве бесконечного цилиндра в неограниченной среде.

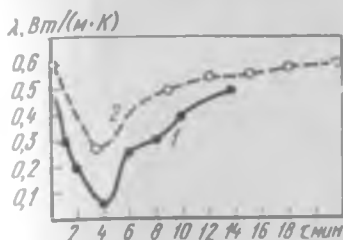


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности λ теста-хлеба в процессе выпечки:

1 — в печи с ИК-излучателями; 2 — в радиационно-конвективной печи Grabender.

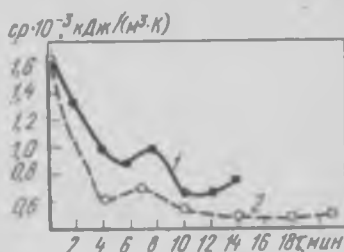


Рис. 2. Изменение объемной теплоемкости c_p теста-хлеба в процессе выпечки:

1 — в печи с ИК-излучателями; 2 — в печи Grabender.

Обработка экспериментальных данных проводится путем анализа температурных кривых поверхности зонда и сравнения коэффициентов теплопроводности эталона и исследуемого объекта. Небольшие размеры датчика зонда (диаметр 0,8 мм) и широкие пределы значений коэффициента теплопроводности (от 0,05 до 0,5 Вт/(м·К) при температуре от 293 до 373 К) обеспечивают возможность применения установки ИТМО для определения теплофизических характеристик в ряде процессов термической обработки пищевых продуктов.

На установке МТИППа проведены исследования теплофизических характеристик теста-хлеба в процессе выпечки, т. е. в течение всего процесса прогрева изделий в опытной печи.

Теоретической основой метода является решение краевой задачи об охлаждении (нагревании) сферического твердого тела, изготовленного из идеального проводника, помещаемого в исследуемую неограниченную (относительно тела) среду.

На рис. 1 и 2 приведены экспериментальные графики, характеризующие изменение коэффициента теплопроводности (λ) и объемной теплоемкости (c_p) теста-мякиша в процессе выпечки при различных методах энергоподвода (ИК-облучение от светлых кварцевых излучателей и радиационно-конвективный энергоподвод при температуре греющих поверхностей около 573 К) [17].

В начале процесса коэффициент λ и объемная теплоемкость c_p уменьшаются, что, очевидно, обусловлено значительным увеличением объема и соответственно пористости тестовой заготовки (первый период выпечки), в порах которой накапливается воздух и другие газы; затем после закрепления объема заготовки (второй период выпечки) коэффициент λ начинает увеличиваться, что, по-видимому, связано с влиянием массообмена на теплообмен, т. е. здесь фактически определялся эффективный коэффициент теплопроводности, на который начинает влиять происходивший в первый период процесса перенос влаги из поверхностных слоев изделий внутрь за счет термовлагопроводности.

На теплофизические характеристики слоев, лежащих в области зоны испарения, влияет также явление фазового перехода. На изме-

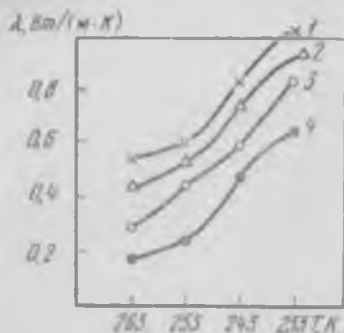


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности λ виноградного сока от температуры замораживания T при концентрации:

1 — 10%; 2 — 20%; 3 — 30%; 4 — 40%.

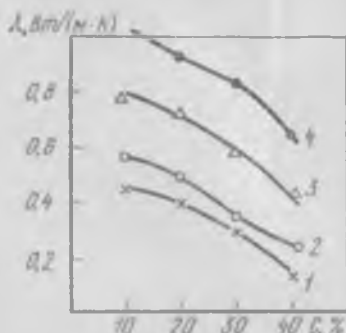


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности λ виноградного сока от концентрации C при температуре:

1 — 263 К; 2 — 253 К; 3 — 243 К; 4 — 233 К.

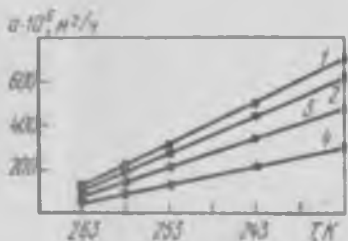


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности виноградного сока от температуры замораживания при концентрации:

1 — 10%; 2 — 20%; 3 — 30%; 4 — 40%.

нение теплоемкости во втором периоде процесса влияет явление денатурации белков и клейстеризации крахмала, которое сопровождается эндотермическим эффектом.

Характерно также, что на процесс выпечки и значения теплофизических параметров влияет метод энергоподвода.

Приведенные выше примеры подтверждают важность исследования теплофизических свойств продуктов непосредственно в процессах их термической обработки. Аналогичные явления наблюдаются и в процессах охлаждения и замораживания жидких пищевых продуктов (плодово-ягодных соков) [7, 12].

Плодовые соки и пюре по структурным характеристикам могут быть отнесены к группе микроскопически гомогенных веществ, т. е. их можно условно рассматривать как полидисперсные системы, в которых влага является компонентом со свойствами, близкими к свойствам свободной воды.

В замороженных соках и экстрактах вода может находиться в различном агрегатном состоянии, т. е. в твердой, жидкой и газообразной фазе. Экспериментально установлена зависимость коэффици-

ента теплопроводности λ виноградного сока от температуры замораживания и концентрации (рис. 3 и 4). Значительное содержание в соке солей, сахаров, кислот и т. п. снижает температуру кристаллизации, а повышение концентрации сухих веществ вызывает значительное уменьшение коэффициента λ .

Возрастание коэффициента температуропроводности a при понижении температуры (рис. 5) обусловлено изменением скорости кристаллизации с увеличением переохлаждения. С повышением концентрации коэффициент a , так же как и λ , уменьшается.

Таким образом, на изменение теплофизических характеристик значительное влияние оказывает не только само явление фазовых переходов, но и скорость этих процессов. Влияние фазовых переходов на теплофизические характеристики рассмотрено Г. И. Красовской в первом разделе книги.

В заключение следует еще раз подчеркнуть важность обоснованного выбора метода определения теплофизических характеристик продуктов с учетом их химического состава, структуры и т. п., а также необходимость создания в экспериментальной установке условий, соответствующих режиму процесса тепловой обработки, для анализа и расчета которого эти характеристики будут использованы.

Учитывая изложенное, в справочнике, там, где это возможно, приводятся значения теплофизических характеристик как для исходного сырья в его натуральном виде, так и для различных стадий последовательной технологической обработки этого сырья; например, для овощей и фруктов даны характеристики: а) продукта натурального, пастеризованного, вареного, жареного и высушенного как конвективным способом, так и методом сублимации и б) продуктов, полученных из овощей и фруктов (соусы, начинки, сиропы, пюре, пасты, соки).

Раздел I

Теплофизические свойства пищевых продуктов и методы их определения

1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Технологические процессы пищевой промышленности и используемые в них материалы (сырье, полуфабрикаты и готовые продукты) имеют свою сильно выраженную специфику по сравнению с процессами и материалами других отраслей технологии и материало-ведения.

Материалы пищевых производств имеют свойства коллоидных капиллярно-пористых тел (тесто, хлеб, зерно, кондитерские изделия и др.), свойства коллоидных тел, гидрофильных в виде растворов, гелей и студней, и свойства кристаллических тел (сахар, соль).

Пищевые материалы при переработке в конечные продукты подвергаются процессам охлаждения и нагревания (варке и обжарке), сушки и увлажнения, воздействию сильных электрических полей и различных излучений: инфракрасного [14], полей СВЧ, ультрафиолетового, а также механической обработке.

При изучении теплофизических характеристик необходимо учитывать строение материала, взаимодействие его с внешней средой, влияние адсорбирующих добавок, резко изменяющих структурно-механические свойства обрабатываемых тел [14], также молекулярные и химические взаимодействия влаги с материалом (формы связи влаги) и условия перемещения ее в материале.

Свойства пищевых материалов обусловлены молекулярными взаимодействиями с окружающей средой по внешней и внутренней поверхности раздела и процессами коагуляции и желирования (например, мармелад).

По величине молекулярных сил сцепления все тела делят на две группы: тела, обладающие малой молекулярной концентрацией — малыми молекулярными силами сцепления (пыль и газы), и тела, обладающие значительными силами молекулярного сцепления (жидкости и твердые тела). Часто жидкости называют предельно сгущенными газами.

У жидких и твердых тел силы молекулярного сцепления примерно одинаковы, и различие между твердым телом и жидкостью определяется дальним или ближним порядком расположения структурных ячеек (атомов, ионов, молекул).

Деление пищевых материалов на твердые и жидкие условно, так как процессы, протекающие в них, происходят с изменением агрегатного состояния всего тела или отдельных составляющих его (переход жидкости в пар, конденсация пара в жидкость, кристаллизация, сублимация и т. д.).

Для характеристики тепловых свойств пищевых материалов используют общие законы теплопроводности. Линейная зависимость между тепловым потоком и температурным градиентом выражается законом теплопроводности Фурье в виде

$$\vec{q} = -\lambda \operatorname{grad} T,$$

где $\vec{q}$ — плотность теплового потока, Вт/м²;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 $\operatorname{grad} T$ — температурный градиент, К/м.

Составляющая теплового потока в направлении x — q_x равна

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}.$$

В законе Фурье минус обозначает, что в направлении потока тепла температура уменьшается. Коэффициент теплопроводности характеризует способность тела проводить тепло. Для пищевых материалов разной структуры механизм передачи тепла различен, численно коэффициент теплопроводности равен количеству тепла, проходящего каждую секунду через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице.

Коэффициент теплопроводности зависит от давления (при сублимации), температуры и влажности, а для дисперсных материалов (типа муки, зерна, сахара-песка) — от размеров частиц, пористости, насыпной плотности, дополнительного конвективного переноса тепла и лучистого теплообмена в порах. Можно считать, что для дисперсных пищевых материалов коэффициент теплопроводности является величиной условной (вводится понятие эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$, в отличие от истинного λ).

Закон Фурье справедлив только для стационарного температурного поля при условии, что

$$T = f(x, y, z); \quad \text{а} \quad \partial T / \partial \tau = 0,$$

где $\partial T / \partial \tau$ — скорость изменения температуры, К/с.

Если температура T пищевого материала является функцией координат и времени — температурное поле нестационарно:

$$T = f(x, y, z, \tau),$$

то для определения температурного поля в любой момент времени в любой точке надо решить дифференциальное уравнение теплопроводности при определенных краевых условиях [25].

Дифференциальное уравнение теплопроводности в трехмерной системе координат имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T,$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — второй дифференциальный оператор Лапласа;

a — коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$); характеризует теплоинерционные свойства пищевых материалов и определяется по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

где c — удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величину ($c\rho$) называют объемной теплоемкостью материала и измеряют в $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость выравнивания температуры (продвижения изотермы) в различных точках температурного поля. При прочих равных условиях быстрее нагреется или охладится то тело, которое имеет большую температуропроводность.

Теплоемкость тела характеризует интенсивность изменения температуры тела при его нагревании или охлаждении. Удельной теплоемкостью c называется величина, определяемая количеством тепла, необходимым для нагревания единицы массы вещества на один градус.

Все три коэффициента: λ , a и c — называются теплофизическими характеристиками материала (ТФХ).

При наличии источников тепла внутри пищевого материала — положительных (например, конденсация влаги, отвердевание жира) или отрицательных (например, испарение) — дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_n}{c\rho},$$

где q_n — количество тепла, выделяемого (или поглощаемого) ежесекундно единицей объема тела, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

На решении дифференциального уравнения теплопроводности при различных краевых условиях основана большая часть экспериментальных методов определения теплофизических характеристик пищевых материалов в различных технологических процессах пищевой промышленности. Для пищевых материалов при выборе метода определения теплофизических характеристик следует принимать краевые условия, соответствующие характеру тепломассообмена в данном процессе, а также учитывать различные формы связи влаги с материалом.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо знать распределение температуры внутри тела в начальный момент времени (начальное условие или временное краевое условие), геометрическую форму тела и закон взаимодействия окружающей среды и поверхности тела (граничное условие или пространственное краевое условие).

Начальное условие определяется заданием закона распределения температуры внутри тела в начальный момент времени, например при $\tau=0$, $T=T_0(x, y, z)$. Во многих практических задачах начальное распределение температуры можно считать равномерным, т. е. при $\tau=0$, $T=T_0=\text{const}$.

При задании граничных условий необходимо учитывать, что создавать на поверхности тела определенное распределение температур можно различными способами. Можно допустить, что температура поверхности тела не зависит от времени или является известной функцией времени.

Существует четыре способа задания граничных условий. Все эти способы можно применить при решении задач теплопроводности и различных технологических процессах пищевой промышленности [17, 18].

Граничное условие первого рода состоит в задании распределения температуры на поверхности тела в любой момент времени, т. е. на поверхности $T = T_{\text{пов}}(x, y, z)$. В частном случае температура на поверхности тела может оставаться постоянной: $T = T_{\text{пов}} = \text{const}$, что происходит при консервировании плодов, овощей и рыбы, при нагреве, выпечке, обжарке изделий в горячем масле или другой жидкой среде с большим коэффициентом теплообмена.

Граничное условие второго рода состоит в задании теплового потока для каждой точки поверхности тела как функции времени, т. е. на поверхности $q = q_{\text{пов}}(x, y, z, \tau)$. Это граничное условие используется при исследовании процесса сушки пищевых материалов термозлучением.

Граничное условие третьего рода состоит в задании температуры окружающей среды T_0 и закона теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой в процессах нагревания и охлаждения тела очень сложен, поэтому применяют для упрощения задачи закон охлаждения Ньютона. По закону Ньютона количество тепла, отдаваемого при охлаждении единицей поверхности тела в единицу времени окружающей среде, пропорционально разности температур между поверхностью тела и окружающей средой, т. е.

$$q_{\text{отд}} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_c),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К). Определяется на основании опыта или по обобщенным критериальным уравнениям.

По закону сохранения энергии это количество тепла равно количеству тепла, подводимому путем теплопроводности изнутри тела к поверхности в единицу времени на единицу поверхности, т. е.

$$q_{\text{отд}} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{пов}} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{пов}} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_c),$$

или на поверхности

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_c - T),$$

где n — внешняя нормаль к поверхности.

При нагревании пищевых и других материалов в воздушном термостате или в камерах с постоянной температурой и постоянным коэффициентом теплоотдачи¹ принимается это граничное условие.

Граничное условие четвертого рода используют при нагревании или охлаждении тела за счет теплового контакта с другим телом иной температуры, например, при соприкосновении разнородных металлических поверхностей различной температуры. По закону Фурье потоки тепла, подводимый и отдаваемый, будут равны:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}.$$

При выпечке подового хлеба два последних граничных условия можно применить, когда образец материала (тесто) лежит одной поверхностью на поду печи, а остальная часть его окружена нагретым воздухом. Граничные условия будут неодинаковы для различных участков поверхности образца. По данным А. С. Гинзбурга, для открытой поверхности каравая принимают граничное условие третьего рода с учетом, что под коэффициентом α надо понимать общий коэффициент теплоотдачи, характеризующий передачу тепла конвекцией и термонизлучением. При этом предполагают, что для определения конструкций печей известна зависимость между температурой теплоотдающих поверхностей и температурой среды пекарной камеры. Коэффициент теплоотдачи α можно определять, исходя из соотношения

$$\alpha = \frac{q}{T_c - T_{\text{пов}}} = \lambda_k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{пов}} \frac{1}{T_c - T_{\text{пов}}},$$

где q — тепловой поток, обусловленный конвекцией, термонизлучением и сконденсировавшимся паром (при выпечке в увлажненной камере) ($\text{Вт}/\text{м}^2$); q определяют по величине температурного градиента у поверхности каравая;

λ_k — коэффициент теплопроводности исследуемого материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Граничные условия для процесса выпечки подового хлеба имеют вид:

на открытой поверхности

$$\frac{\partial T_1}{\partial n} + \frac{\alpha}{\lambda_1} (T_c - T_1) = 0;$$

на поверхности, соприкасающейся с подом

$$T_1 = T_{\text{п.д}} = \text{const};$$

на границе раздела корки и мякиша

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} + D,$$

где D — учитывает теплоту конденсации пара на поверхности теста

¹ На величину α может оказывать влияние массообмен между поверхностью тела и окружающей средой.

Рассмотренный пример служит иллюстрацией использования граничных условий третьего и четвертого рода.

Дифференциальное уравнение совместно с начальными и граничными условиями полностью определяет задачу. Зная геометрическую форму тела, начальные и граничные условия, можно решить уравнение и найти функцию распределения температуры в теле в любой момент времени.

Полученная функция $T=f(x, y, z, \tau)$ должна удовлетворять дифференциальному уравнению, а также начальному и граничному условиям.

НЕКОТОРЫЕ СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Основные формы связи влаги с материалом

Законы перемещения тепла и влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах (влажных материалах) должны учитывать связь влаги с материалом, так как с изменением характера связи влаги изменяются физические свойства тела [14]. По данным А. В. Лыкова, все влажные материалы можно разделить на три вида: 1) коллоидные тела — это эластичные гели, которые при удалении влаги значительно изменяют свои размеры (сжимаются), но сохраняют свои эластичные свойства; 2) капиллярно-пористые тела или, как их часто называют, хрупкие гели — это такие материалы, которые при удалении влаги становятся хрупкими, мало сжимаются и могут быть превращены в порошок и 3) коллоидные капиллярно-пористые тела — материалы, обладающие свойствами двух первых тел; стенки их капилляров эластичны и при поглощении влаги изменяются; это мука, крахмал, зерно, дерево и т. п.

Коллоидные тела обладают огромной внутренней поверхностью, поэтому отличаются большой адсорбционной способностью: они адсорбируют на своей поверхности ионы электролитов, молекулы растворителя и т. д. Вследствие адсорбции ионов коллоидная частица имеет определенный заряд. Коллоидная частица с адсорбционным слоем и зарядом называется мицеллой. Жидкость может находиться на поверхности мицеллы, а также проникать внутрь ее.

Эластичные гели поглощают наиболее близкие по полярности жидкости, при этом они увеличивают свои размеры — набухают.

По классификации П. А. Ребиндера различают следующие формы связи влаги с материалом: химически связанную влагу, адсорбционную, капиллярную и влагу набухания.

Химически связанная — это влага, наиболее прочно связанная с материалом. Она не удаляется из материала при тепловой сушке, поэтому здесь не рассматривается.

Адсорбционная влага — это жидкость, удерживаемая молекулярным силовым полем по лиофильным группам у поверхности раздела частиц (мицелл) с окружающей средой. Эта жидкость входит в общее количество влаги набухания. Адсорбционная влага прочно связана с материалом, ее иногда называют связанной влагой.

Поверхностные слои тел обладают свободной потенциальной

энергией. Поэтому поверхности тела адсорбируют газ и водяной пар. Водяной пар сжимается и превращается в жидкость. Процесс адсорбции происходит не только на внешней, но и на всех внутренних поверхностях коллоидного тела. При адсорбции выделяется тепло — теплота гидратации, так как при этом потенциальная энергия поверхностных слоев переходит в теплоту. С увеличением влажности W количество выделяемого тепла Q уменьшается (рис. 6) и при

некоторой влажности становится равным нулю, когда полностью израсходуется поверхностная энергия.

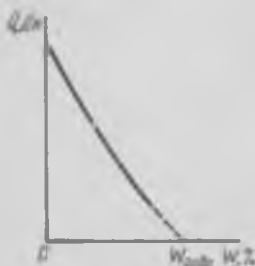


Рис. 6. Зависимость количества тепла, выделяемого при гидратации, от влажности материала.

Количество влаги, поглощаемое материалом с выделением тепла и контракцией системы¹, называется гидратационной влажностью $W_{гидр}$. Таким образом, процесс гидратации — это процесс присоединения адсорбционной влаги. Влага в этом слое находится в особом уплотненном состоянии (связанная влага), она не растворяет обычно растворимые вещества (соль, сахар), плотность ее несколько отличается от единицы, диэлектрическая проницаемость этой влаги меньше, чем у свободной влаги, замерзает она при более низкой температуре.

Адсорбционная влага перемещается в виде пара, т. е. жидкость, адсорбированная на внутренних поверхностях, испаряется и затем диффундирует в виде пара. С достижением гидратационной влажности процесс присоединения влаги к коллоидному телу не прекращается, но поглощение обуславливается уже другими силами (осмосом).

Капиллярная влага — это влага, находящаяся в узких порах материала — капиллярах.

Влага микрокапилляров заполняет капилляры, средний радиус которых меньше 10^{-7} м. Жидкость может заполнять любые микрокапилляры не только при непосредственном соприкосновении с ней, но и путем сорбции из влажного воздуха. Влага макрокапилляров находится в капиллярах, средний радиус которых больше 10^{-7} м.

Радиусы микро- и макрокапилляров настолько малы, что свободная поверхность жидкости в них принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения и взаимодействия со стенками капилляров, мало искаженную силой тяжести. Под влиянием лапласовского давления p_s (Па), обусловленного поверхностным

¹ Под контракцией системы при поглощении влаги понимают разность между суммарным объемом твердого тела $V_{тв.т}$ и жидкости $V_{ж}$ и объемом влажного тела $V_{вл.т}$, т. е.

$$\Delta V = (V_{ж} - V_{тв.т}) - V_{вл.т};$$

$$V_{вл.т} < (V_{ж} + V_{тв.т}).$$

натяжением и кривизной поверхности жидкости, происходит капиллярное всасывание ее:

$$p_3 = \frac{2\sigma}{r},$$

где σ — поверхностное натяжение, Н/м;

r — радиус мениска, м.

Молекулярное давление на границе жидкость — пар для вогнутой поверхности меньше нормального значения для плоской поверхности, а для выпуклой больше, чем для плоской, на величину p_3 .

Если допустить, что поры влажных материалов имеют форму цилиндрических капилляров, то высота поднятия жидкости в них h (в м) может быть рассчитана по формуле

$$h = \frac{2\sigma}{\rho R} \cos \theta,$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

R — радиус капилляра, м;

θ — краевой угол, угол смачивания.

По высоте поднятия жидкости в капилляре можно определить величину всасывающей силы (рис. 7). Если предположить, что вода полностью смачивает капилляр (т. е. $\theta = 0$) и находится при температуре 293 К, то в капиллярах с радиусом 10^{-8} м (примерно в 100 раз превышающих размеры молекул) капиллярное поднятие воды достигает 1,5 км, а в капиллярах с радиусом 10^{-9} м (около 10 диаметров молекул) вода поднялась бы на 15 км. Следовательно, пористое тело с радиусом капилляров в 10^{-10} м всасывает воду с огромной силой. Если длина капилляра очень мала (что имеет место в реальных капиллярно-пористых телах), то стремление вогнутого мениска уменьшить свою поверхность создает силу, действующую на поверхность жидкости и стремящуюся переместить ее в капилляре. Давление насыщенного пара над вогнутым мениском всегда меньше, чем давление насыщенного пара над плоской поверхностью (при данной температуре), на величину, пропорциональную лапласовскому давлению.

В капиллярно-пористых телах перемещение влаги происходит в виде жидкости и в виде пара.

Для пищевых материалов в процессах сушки, увлажнения, выщелачивания и др. следует учитывать характер связи влаги с материалом, так как с изменением вида связи могут изменяться физические свойства материала.

Влага набухания — структурная влага, поглощаемая сложной построенной мицеллой. Влага набухания состоит из влаги осмотической и иммобилизованной (захваченной при формировании



Рис. 7. Высота поднятия жидкости в капилляре.

структуры тела), она поглощается телом без выделения тепла и сокращения системы (в отличие от гидратационной), но при этом происходит увеличение объема и изменение давления набухания.

Как показали исследования, проведенные С. М. Липатовым и его учениками, набухание геля представляет собой не набухание стенок ячеек (клеток), а увеличение их объема. По теории С. М. Липатова проникновение осмотической влаги можно объяснить следующим образом: гель состоит не из однородных частиц, а из смеси фракций различной молекулярной массы. Фракции высокомолекулярной массы нерастворимы в воде, тогда как фракции низкомолекулярной массы растворимы. Гель представляет собой скелет в виде замкнутых клеток, состоящих из фракций высокомолекулярной массы. В этих клетках находится растворимая фракция, которая не способна пройти через стенку клетки. Фракция низкомолекулярной массы находится не только внутри клетки, но и на ее поверхности. В процессе формирования ядра коллоидной частицы часть такой фракции захватывается им, попадает внутрь (теория С. М. Липатова) и создает осмотическое давление, в результате которого влага проникает внутрь клетки. Влага осмотически проникает внутрь клеток геля, поэтому гель должен иметь ячеистую структуру. Проникновение влаги можно объяснить тем, что растворимая фракция адсорбируется на поверхности мицеллы, образованной из нерастворимой фракции высокомолекулярной массы. Адсорбированные частицы находятся в состоянии броуновского движения, что и служит причиной осмотического проникновения.

Под влиянием диффузионно-осмотических сил влага проникает внутрь клетки по типу избирательной диффузии (осмоса) жидкости через полупроницаемую стенку клетки. Если гель имеет свойства капиллярно-пористого тела, то влага будет поглощаться путем капиллярного всасывания.

Влияние агрегатного состояния и структуры пищевых продуктов на их теплофизические характеристики

Определение теплофизических характеристик пищевых материалов очень сложно, так как в реальных процессах невозможно теплообмен отделить от массообмена и часто от термовлагопроводности.

Теплофизические свойства определенного пищевого материала зависят от его агрегатного состояния. В процессах сублимации, испарения, нагрева, кристаллизации пищевые материалы имеют свойства жидких, твердых и газообразных тел, и переход из одного агрегатного состояния в другое может сопровождаться изменением теплофизических характеристик.

Для объяснения процесса переноса тепла в пищевых материалах применим современные представления о строении жидких и твердых тел. Переход пищевых материалов из одних агрегатных состояний в другие, например из твердого состояния в жидкое, в физике объясняется наличием в твердых телах дальнего порядка расположения структурных элементов (молекул, атомов, ионов), а в жидкостях — ближнего порядка. В твердом теле вокруг одного из узлов, или ячеек, остаются одни и те же соседние ячейки. При переходе к ближнему порядку (при нагревании материала) увеличивается амплитуда

колебания узлов и возможна смена соседних ячеек — начинается процесс плавления. При дальнейшем повышении температуры возможен переход в газообразное состояние. При переходе из жидкого состояния в твердое (кристаллизация сахарозы, затвердевание карамельной массы, замораживание продуктов и т. п.) вследствие возрастания сил взаимодействия между частицами ограничивается свобода их движения.

Многие пищевые продукты содержат влагу в количестве 70—90 % от общей массы (фрукты, овощи, мясо), поэтому для правильного понимания процесса релаксации энергии в них надо учитывать характер сил, действующих между микрочастицами (под релаксацией энергии понимают переход системы в равновесное состояние).

На основе квантовомеханических представлений действующие силы и энергию можно определить с достаточной степенью точности, исходя из условия, что чем точнее определяется изменение энергии ΔE , тем меньше достоверность определения изменения времени Δt .

Так,

$$\Delta E \Delta t > h, \quad \Delta E > \frac{h}{\Delta t},$$

где h — постоянная Планка; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Аналогична связь изменения импульса микрочастицы с изменением координаты:

$$\Delta K \Delta x > h,$$

где ΔK — изменение импульса микрочастицы;

Δx — изменение ее координаты.

Изменение координаты определяет величину действующих сил. Это видно на потенциальных кривых, выражающих графическую зависимость потенциальной энергии от координаты x для упругих взаимодействий в твердых телах, или на потенциальных кривых ковалентной (гомеополярной) связи для атомных кристаллов. Атомные кристаллы имеют в узлах однородные или разнородные атомы, но благодаря наличию сильных обменных взаимодействий между ними возникают большие силы притяжения или отталкивания в зависимости от ориентации спинов (внутренних вращательных моментов электронов) коллективизированных электронов.

Для ковалентной связи характерна потенциальная кривая (рис. 8).

$$W_n = f(x).$$

Силу, действующую между узлами структурной решетки, определяют первой производной от потенциальной энергии по координате

$$F = - \frac{dW_n}{dx},$$

где F — сила, действующая между узлами структурной решетки, определяется тангенсом угла наклона касательной к потенциальной кривой. При этом наибольшее притяжение между атомами соответствует потенциальной яме на участке $x_1 x_2$. Аналогичные потенциальные кривые, только другого вида, можно получить для ионных и молеку-

лярных решеток. Потенциальные кривые позволяют доказать, что бесконечное сближение молекул жидкости невозможно (участок x_2x_1), так как возникают бесконечно большие силы отталкивания.

До настоящего времени не установлена зависимость теплофизических свойств твердых и жидких пищевых материалов от их строения и характера связи микрочастиц. Определение такой зависимости является трудной, но очень важной задачей.

Большая часть материалов пищевой промышленности — жидкие (электролиты) и твердые (влажные материалы) — содержат микро-

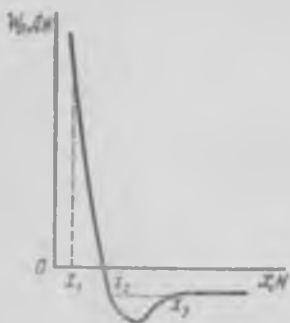


Рис. 8. Потенциальная кривая для ковалентной связи.

частицы и квазичастицы: электроны, ионы, фотоны и фононы различных частот и энергий. Фононы относят к квазичастицам. Фонон подчиняется статистике Бозе—Эйнштейна; бозе-частица называется бозоном. Если в проводниках носителями тепла могут быть электроны и фононы, то в диэлектриках (пищевых материалах) при нормальных температурах носителями тепла являются в основном фононы — кванты звука.

Теоретический расчет коэффициента теплопроводности диэлектриков приводит к выводу, что коэффициент теплопроводности λ пропорционален длине релаксации энергии l_2 . Система в процессе релаксации проходит различные состояния, постепенно приближаясь к состоянию теплового

равновесия. Временем релаксации называется промежуток времени, за который происходит процесс релаксации энергии.

В процессе теплопроводности при наличии электронной, ионной или фононной составляющих учитывается, что в момент столкновения частиц происходит передача энергии. Мерой столкновений является средняя длина свободного пробега микрочастиц, или квазичастиц тела; роль меры столкновений для процесса теплопроводности выполняет l_2 — длина релаксации энергии.

Согласно молекулярно-кинетической теории теплопроводность обусловлена переносом энергии микрочастицами под влиянием температурного градиента, а для влажного материала процесс усложняется термовлажностью, так как дополнительный перенос тепла осуществляется влагой.

В диэлектриках существует (подобно электронному газу в металлах) фононный газ, обладающий особыми свойствами. Число квазичастиц в фононном газе различно в зависимости от условий, в которых находится тело. При температуре, близкой к абсолютному нулю, фононов почти нет. С повышением температуры их число $n_{\text{фон}}$ увеличивается сначала пропорционально третьей степени абсолютной температуры, а потом пропорционально абсолютной температуре. Фонон не может иметь бесконечно большой энергии. Максимальную энергию фонона принято измерять в градусах, а не в джоулях.

Величина максимальной энергии фононов, измеренная в градусах, называется температурой Дебая или характеристической темпе-

ратурой. Дебаем была создана квантовая теория тепловых свойств кристаллов.

Так как фонон — квант звука, то его энергию можно определить. $E_{\text{фон}} = \hbar \omega$, где $\hbar$ — квант действия; $\hbar = h/2\pi$; h — постоянная Планка, ω — циклическая частота звуковой волны.

Импульс фонона равен $P_{\text{фон}} = 2\pi\hbar/\lambda_{\text{зв}}$, где $\lambda_{\text{зв}}$ — длина звуковой волны, м; а так как

$$\omega = \frac{2\pi\nu}{\lambda_{\text{зв}}},$$

(где ν — скорость звуковой волны, м/с), то энергия фонона будет

$$E_{\text{фон}} = \frac{2\pi\hbar\nu}{\lambda_{\text{зв}}}.$$

Так как минимальная длина волны равна расстоянию между атомами d , максимальная энергия фонона $E_{\text{макс}}$ будет приближенно равна

$$E_{\text{макс}} = \frac{2\pi\hbar\nu}{d}.$$

Наличие у фононов максимальной энергии приводит к зависимости распределения по энергиям от температуры.

Температура Дебая

$$\theta_D = \frac{2\pi\hbar\nu}{k_B d},$$

где k_B — постоянная Больцмана, определяющая величину энергии микрочастицы (здесь фонона), приходящуюся на один градус; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, а $d = 10^{-10}$ м.

При этих условиях температура Дебая приближенно равна 100 К, а так как комнатная температура равна 300 К, то все пищевые материалы, характеризующиеся фононной теплопроводностью, уже при комнатной температуре имеют максимальную энергию фононов. При температуре $T \gg \theta_D$ большая часть фононов имеет энергию, близкую к максимальной. Поэтому принято считать температуру низкой, если $T < \theta_D$, и высокой, если $T > \theta_D$.

Для объяснения теплопроводности твердых пищевых материалов можно пользоваться теорией Дебая, представляя возбужденное состояние решетки как идеальный газ фононов и определяя теплопроводность уравнением

$$\lambda = 1/3 c_V l \nu$$

(у А. Миснара [20] коэффициент пропорциональности $1/4$ вместо $1/3$), где c_V — удельная теплоемкость фононного газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

l — средний свободный пробег фононов при соответствующей частоте, т. е. среднее расстояние между двумя последовательными соударениями фонона, м;

ν — скорость звука в данном теле, м/с.

Теоретические выводы показывают, что при достаточно высоких температурах средний свободный пробег фонона l обратно пропорционален абсолютной температуре; следовательно, и коэффициент теплопроводности при $T > \theta$ обратно пропорционален абсолютной температуре, а при температуре $T < \theta$ (приближающейся к абсолютному нулю) коэффициент теплопроводности становится пропорциональным T^3 (рис. 9), так как с понижением температуры внутренняя энергия и теплоемкость убывают пропорционально T^3 . По теории

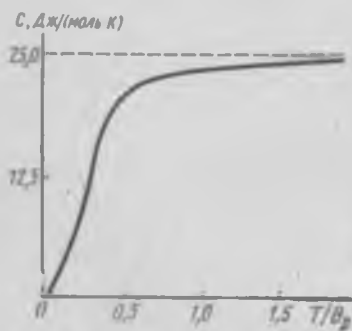


Рис. 9. Зависимость молярной теплоемкости от отношения абсолютной температуры к температуре Дебая θ_D .

Дебая колебания узлов не гармонические и гасят друг друга. Пайерлс в 1929 г. установил для низких температур, что зависимость $\lambda = f(T)$ обусловлена гашением колебаний, нарушением их гармоничности. Фононная теория более точно характеризует процесс теплопроводности. Так можно описать механизм теплопроводности твердых материалов.

А. Миснар [20], исходя из того, что физические свойства тела определяются числом и расположением микрочастиц, вывел общие формулы для коэффициента теплопроводности, связывающие его с плотностью,

молярной массой, температурой плавления, удельной теплоемкостью, дипольным моментом и другими величинами, которые могут быть определены для данного вещества.

В подтверждение ранее изложенных выводов о зависимости λ от T приводятся закономерности изменений, по данным А. Ф. Чудновского [28], для кристаллических и аморфных тел, жидкостей и газов (рис. 10).

Эйкен в 1910 г. установил различие в изменении теплопроводности кристаллов и аморфных тел. Теория Эйкена, Дебая и Пайерлса применимы к материалам пищевой промышленности.

А. Миснар [20] получил общие зависимости для коэффициента теплопроводности чистых веществ в любом агрегатном состоянии, а также технических материалов, представляющих собой гетерогенные тела сложной структуры, включающие пустоты, воздух и влагу. При этом автор, базируясь на теории Дебая, рассматривает процесс передачи тепла в веществе как волновой, при котором термическое сопротивление обусловлено рассеянием волн, аналогично рассеянию лучистой энергии в газе [20, 24]. А. Миснар получил линейную зависимость теплопроводности от плотности. Аналогичная линейная зависимость получена Р. Ф. Скаковским [24] для подсолнечной лузги.

В работах Миснара [20] для материалов органического происхождения, например древесины, учет влияния влажности дал завышенные результаты. При этом в соответствии со схемой Кришера и Ронгальтера рассматривается дополнительный перенос тепла внутри

поры за счет испарения с одной стороны ее и конденсации на другой. Хорошая сходимость получена при расчете композиций целлюлоза — вода и целлюлоза — воздух. Однако в древесине и в других капиллярно-пористых телах органического происхождения необходимо учитывать, что в капиллярах может находиться не воздух, а газообразная смесь с повышенным или пониженным содержанием кислорода и CO_2 . Различный состав газов в полостях древесины известен из работ П. И. Крамера и Т. Т. Козловского.

Л. И. Красовским и В. А. Чашукиным [15] для ростника экспериментально доказано, что содержание кислорода в корневищах, находящихся в грунте под водой, за летний период увеличивается от 4—9% (весной) до 15—19% (к середине лета), а при наземном прорастании — от 12 до 19%. Содержание кислорода в стеблях колеблется от 19 до 22%, в листьях — от 12 до 23%.

До настоящего времени при рассмотрении явлений тепло- и массообмена считали, что в порах — капиллярах тел воздух неизменно может содержать 21% O_2 , между тем в листьях чая и другом растительном пищевом сырье состав газовой среды мало изучен. Например, у А. Миснара все расчеты λ даны для воздуха и водяного пара в порах без учета содержания CO_2 и изменяющегося количества (процентного содержания) кислорода.

Кроме того, в указанных расчетах А. Миснара не учитывался характер связи влаги с материалом.

Определение коэффициента теплопроводности теста-хлеба с учетом его пористости и характера распределения пор дано в работах А. С. Гинзбурга.

При температуре ниже нуля А. Миснар рассчитывал теплопроводность древесины по тем же формулам, которые применялись для положительных температур, принимая теплопроводность $\lambda_{\text{вода}} = 2,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Однако при отрицательных температурах не вся влага в древесине и в других органических пористых материалах превращается в лед, значительная часть капиллярной влаги может находиться в переохлажденном состоянии. Экспериментально для веток осины, хвой, сосны и других материалов Л. И. Красовским и В. А. Чашукиным [16] было доказано, что процент незамерзающей влаги достигает 46—60% как для живых, так и для омертвевших растительных тканей [рис. 11 (а, б)], т. е. микрокапиллярная влага не замерзает. Даже при температуре 247 К остается около 30% незамерзающей воды. Для пищевых материалов такие данные получены Л. Риделем, Г. Б. Чижовым.

Количество незамерзающей влаги в живых тканях (в % к их водности) на 10—20% больше по сравнению с количеством ее

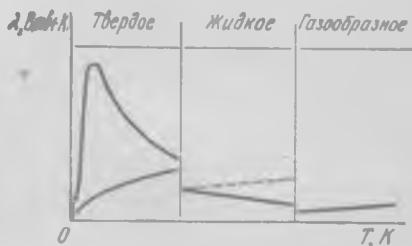


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности твердых, жидких и газообразных тел от температуры.

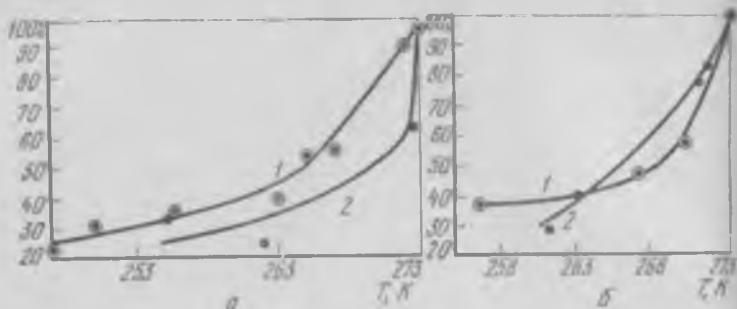


Рис. 11. Количество незамерзающей воды в растительных тканях при отрицательных температурах (в % к общему влагосодержанию): а — в хвое сосны; б — в ветках осины; 1 — живые клетки; 2 — клетки, омертвевшие от кипячения.

в омертвевших тканях, но при 267 К почти 50% влаги не замерзает (см. рис. 11, а и б).

При расчетах теплопроводности капиллярно-пористых тел органического происхождения в областях отрицательных температур необходимо учитывать содержание в них незамерзающей воды, так как она для овощей и фруктов может составить большую величину. При исследовании структур пищевых материалов растительного происхождения следует учитывать процентное содержание в них льда и незамерзающей воды при низких температурах (при охлаждении, сублимации).

Одной из основных тепловых характеристик пищевых материалов является теплоемкость.

Классическая молекулярно-кинетическая теория определяет молярную теплоемкость тела C как первую производную внутренней энергии тела по абсолютной температуре:

$$C = \frac{dU}{dT}$$

где dU — изменение внутренней энергии тела, Дж;

dT — изменение температуры, К.

Под внутренней энергией U понимают совокупность кинетической энергии поступательного, вращательного и колебательного движения микрочастиц, потенциальной энергии, обусловленной силами взаимодействия микрочастиц, и энергии излучения (всех диапазонов частот). При этом учитывается взаимное влияние микрочастиц и квазичастиц друг на друга.

В твердом пищевом материале теплоемкость обусловлена энергией фононов структурной решетки. Следовательно, теплоемкость зависит от структурной решетки данного материала, и, если при изменении температуры пищевого материала происходят структурные изменения (плавление, испарение), то нарушается монотонный характер температурной зависимости теплоемкости. Различие графической зависимости между эффективной и истинной теплоемкостью

позволяет обнаружить фазовые переходы и определить тепловой эффект, если фазовый переход сопровождается изменением внутренней энергии. Например, для какао-бобов аналогичные кривые (рис. 12) были получены в экспериментах А. А. Агроскина и Е. И. Гончарова [1]. Они подсчитали графическим методом суммарный эндотермический эффект на основании того, что теплота полиморфных превращений, испарения влаги и химических реакций определяется графически площадью, ограниченной кривыми эффективной (кривая 1) и истинной (кривая 2) теплоемкости.

Опыты А. А. Агроскина и Е. И. Гончарова вносят существенные поправки в данные, приводимые для теплоемкости какао-бобов в справочнике Н. А. Чубика и А. М. Маслова.

Выводы классической теории теплоемкости для газов можно применить к жидким и твердым телам. Допуская, что для твердого тела выполняется гипотеза о равном распределении внутренней энергии по степеням свободы, получаем, что на каждую степень свободы приходится энергия, равная $\frac{1}{2} kT$, где k — постоянная Больцмана. Отсюда следует, что молярная теплоемкость твердых тел

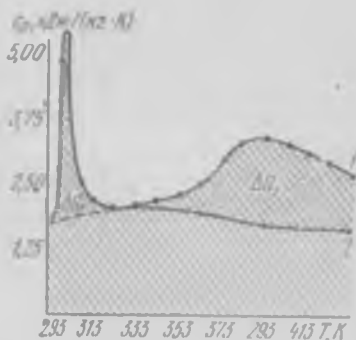


Рис. 12. Зависимость теплоемкости бобов от температуры: 1 — эффективной; 2 — истинной.

$$C = 3R \text{ (закон Дюлонга и Пти),}$$

где R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль К).

Закон Дюлонга и Пти выполняется только для химически простых кристаллических тел при $T > \Theta_D$; Θ_D — температура Дебая для данного вещества.

Теплоемкость по классической теории не зависит от температуры, а из квантовой теории Дебая следует, что теплоемкость тел вблизи абсолютного нуля пропорциональна кубу абсолютной температуры (закон кубов Дебая):

$$C = \frac{12\pi^4 R}{5\Theta^3} T^3.$$

Область применения закона кубов Дебая находится ниже температуры $2 \cdot 10^{-2} \Theta_D$.

На кривой (см. рис. 9), характеризующей зависимость теплоемкости c от отношения абсолютной температуры T к температуре Дебая Θ_D , при низких температурах наблюдается убывание теплоемкости, пропорциональное кубу абсолютной температуры.

Уменьшение молярной теплоемкости большинства твердых тел с понижением температуры, когда температура ниже дебаевской, связано с тем, что энергия, приходящаяся на одну степень свободы,

недостаточна для возбуждения фононов больших частот. К телам сложной структуры теория теплоемкости Дебая не всегда применима, так как их энергетический спектр состоит из многих частот.

Теплоемкость жидких пищевых материалов органического происхождения определяется по тем же законам, что и для твердых тел, с учетом специфики их строения. Для жидких и газообразных тел принято различать теплоемкость при постоянном давлении C_p и теплоемкость при постоянном объеме C_v :

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p \quad \text{и} \quad C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v,$$

где C_v и C_p — молярные теплоемкости тела при постоянном объеме и постоянном давлении, Дж/(моль·К).

Для твердых тел C_p и C_v практически равны. Для жидкостей разность молярных теплоемкостей $C_p - C_v$ равна работе изобарического расширения моля жидкости при его нагревании на 1 К. Численное значение этой разности зависит от значения коэффициента объемного расширения жидкости и от величины внутренних сил взаимодействия микрочастиц жидкости, против которых и совершается работа расширения. Из экспериментальных данных известно, что теплоемкость жидких пищевых материалов зависит от температуры, у разных жидкостей характер зависимости различный.

У большинства жидких пищевых материалов с повышением температуры теплоемкость увеличивается, а у некоторых с повышением температуры теплоемкость уменьшается, например у воды. Сложный характер изменения теплоемкости является одной из аномалий воды. С повышением температуры воды ее теплоемкость сначала уменьшается, а затем, пройдя через минимум, увеличивается.

Удельная теплоемкость жидкости c_p по Миснару приближенно может быть определена по закону аддитивности молярных теплоемкостей и теплоемкостей групп атомов, если известна химическая формула жидкости:

$$c_p = \frac{aA_p + bB_p + dD_p + eE_p}{M},$$

где A_p , B_p , D_p , E_p — молярные теплоемкости или теплоемкости групп атомов, Дж/(моль·К);

M — молярная масса жидкости.

Ф. М. Камья [8] использовал импульсное уравнение для решения сложных задач теплопроводности при помощи ЭВМ с целью получения метода, пригодного для решения любой тепловой задачи. В книге Ф. М. Камья дана импульсная теория теплопроводности и даны преобразования общей вектор-задачи для ввода в ЭВМ, а также показано, что с помощью ЭВМ могут решаться задачи при наличии фазового перехода.

Коэффициент температуропроводности a пищевых материалов является основной тепловой характеристикой и определяется экспериментально или рассчитывается, если известны коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c и плотность ρ материала или для сыпучих — насыпная масса ρ_n , по известной формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

По квантовомеханическим представлениям теплоинерционные свойства тела зависят от скорости и энергии фононов, так как скорость распространения фононов пропорциональна циклической частоте и амплитуде. Энергия, переносимая фононами, пропорциональна квадрату их частоты, эта энергия и обуславливает процесс передачи тепла.

Для пищевых материалов в каждом отдельном случае в зависимости от влажности, температуры, плотности, пористости, жирности и других свойств материала могут изменяться значения коэффициента температуропроводности (например, см. данные для сахара-песка [3]).

Подробные данные с их характеристикой для различных пищевых материалов систематизированы М. А. Громовым [25]. По его данным, для круп коэффициент температуропроводности с увеличением влажности, температуры и насыпной массы уменьшается, в то же время для меда с повышением температуры температуропроводность α уменьшается, а с повышением влажности увеличивается. Этими примерами подтверждается необходимость индивидуальной оценки теплоинерционных свойств каждого пищевого продукта.

Тепловую активность пищевых материалов, или коэффициент теплоусвоения, относят к числу величин, характеризующих теплофизические свойства тел, так как ее можно рассчитать, зная теплопроводность, плотность и теплоемкость тела.

Тепловая активность тела $\epsilon = \lambda c \rho$ или b введена при решении задач теплопроводности [17, 18] для характеристики относительной температуры θ двух соприкасающихся тел, например стержней (рис. 13). Если первый стержень имеет температуру $T_1(x, \tau)$, а второй температуру $T_2(x, \tau)$ и соответственно теплофизические свойства первого стержня характеризуются величинами λ_1, a_1, c_1 , а второго стержня — величинами λ_2, a_2, c_2 и $T_1 = T_2$, то K_* , характеризующий тепловую активность первого стержня относительно второго стержня, будет равен отношению соответствующих коэффициентов тепловой активности. Если тепловые активности стержней одинаковы ($K_* = 1$), то относительная температура θ будет равна 0,5.

По определению

$$K_* = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2},$$

где ϵ_1 — коэффициент тепловой активности первого стержня;
 ϵ_2 — коэффициент тепловой активности второго стержня.

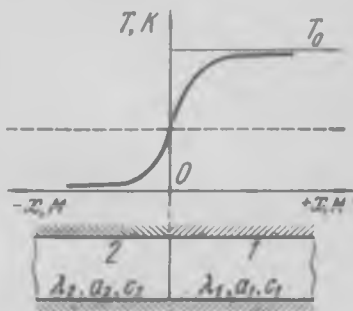


Рис. 13. Температурное поле двух соприкасающихся полуограниченных стержней.

На границе соприкосновения тел температура $\theta=0,5$ устанавливается сразу после соприкосновения их и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена, так как

$$\theta = (0, \tau) = \theta(x, \infty) = \text{const.}$$

Величина $\theta(0, \tau)$ изменяется от нуля (минимальная тепловая активность) до единицы (максимальная тепловая активность). Таким образом, величина $\theta(0, \tau)$ характеризует понижение относительной температуры полуограниченного тела при его соприкосновении с другим полуограниченным телом.

$$\theta_1 = \frac{T_1(x, \tau)}{T_0}, \quad \theta_2 = \frac{T_2(x, \tau)}{T_0},$$

где T_0 — температура тела при $\tau=0$, К.

Влияние фазовых переходов на теплофизические характеристики пищевых продуктов

Фазовым переходом называется сложное физическое явление, состоящее в перестройке структуры вещества, сопровождаемой выделением или поглощением энергии, или в изменении упорядоченности в кристаллической решетке без разрыва значения энтропии S и объема V вещества, или в возникновении сверхтекучести, или в изменении магнитных свойств металлов (в состоянии сверхпроводимости).

Термодинамическое определение фазовых переходов связывает характер их протекания с термодинамическими параметрами p, V, T , с изменением энтропии системы $dS = \frac{dQ}{T}$, с теплоемкостями (C_p или C_v), с энергией эндо- или экзотермических реакций, с функцией Гиббса G (считая, что функция Гиббса определяет свободную энергию системы U , равную работе, которую можно произвести при постоянном давлении p и температуре T).

Для системы с переменным числом микрочастиц квантовых систем выводится общий потенциал Гиббса. В простейшем случае функцию Гиббса можно принять равной:

$$dG = d(U - TS + pV),$$

где U — внутренняя энергия, Дж;
 T — абсолютная температура, К;
 S — энтропия, Дж/К;
 p — давление, Па;
 V — объем системы, м³.

Классификация фазовых переходов. Пищевые материалы могут находиться в нескольких фазах, сохраняя твердое или жидкое состояние, но составляющие их компоненты могут переходить из одного агрегатного состояния в другое (например, переход льда в пар при сублимационной сушке, когда форма и размеры высушиваемого продукта сохраняются; испарение со свободной поверхности при нагреве и др.).

Пищевые материалы имеют связь с влагой различных форм и технологические процессы могут сопровождаться фазовыми переходами, как правило, первого рода. Фазовых переходов существует несколько.

Фазовым переходом первого рода называется такой переход вещества из одной фазы в другую, который сопровождается фундаментальной перестройкой структуры вещества (переход на молекулярном уровне ближнего порядка в дальний и наоборот). Этому переходу сопутствует изменение объема, вязкости и других характеристик. При фазовом переходе первого рода, на границе его, энтропия S и объем V изменяются скачком. Такие переходы обязательно сопровождаются поглощением или выделением энергии в форме удельной теплоты плавления, отвердевания, кристаллизации, испарения, конденсации и т. д.

Эта теплота фазового перехода характеризует скачкообразное изменение энтропии системы, теплоемкость вещества при этом переходе имеет бесконечно большую величину:

$$C_V = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{dU}{dT} \right) \rightarrow \infty.$$

Поэтому для правильного расчета теплоемкости следует определить удельную теплоту фазового перехода и уменьшить на эту величину значение теплоемкости.

В физике под удельной теплоемкостью c_V и c_p понимают только то количество тепла, которое необходимо для нагревания единицы массы вещества на один градус, соответственно молярной теплоемкостью C_V или C_p — 1 моля вещества на один градус.

Молярная теплоемкость при постоянном объеме C_V дана выше, а молярная теплоемкость при постоянном давлении C_p дается в следующем виде:

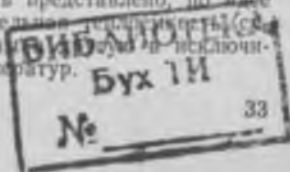
$$C_p = C_V + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right].$$

А под удельной (иногда ее называют скрытой) теплотой фазового перехода понимают то количество тепла, которое необходимо подвести к веществу, чтобы при данной температуре фазового перехода (плавления, испарения, кипения) единицу массы вещества перевести из твердой фазы в жидкую, из жидкой — в парообразную. При отвердевании вещества или компонента, кристаллизации, конденсации, наоборот, вещество — пищевой материал — выделяет удельную теплоту фазового перехода и удельная теплоемкость соответственно уменьшается на эту величину, а теплоемкость влияет на теплопроводность λ и температуропроводность a , так как три теплофизические характеристики связаны следующим уравнением:

$$\lambda = ac\rho,$$

где ρ — плотность материала, кг/м^3 .

Тепло фазового перехода может быть представлено, по идее Ф. М. Камья, как очень большая дополнительная теплоемкость, существующая в момент перехода одной фазы в другую, но исключительно малом, но не нулевом интервале температур.



Представление Ф. М. Камья [8] о тепле фазового перехода как о большой дополнительной теплоемкости является спорным, так как фазовый переход может сопровождаться поглощением или выделением тепла соответственно эндотермическому или экзотермическому процессам и, следовательно, вызовет уменьшение или возрастание теплоемкости.

Фазовыми переходами второго рода называются переходы, сопровождающиеся изменением упорядоченности в кристаллической решетке вещества и отсутствием скачкообразного изменения энтропии S и объема V .

При фазовом переходе второго рода теплоемкость имеет разрыв, но не становится при температуре фазового перехода бесконечно большой величиной, как при фазовом переходе первого рода.

Фазовый переход, связанный с явлением сверхпроводимости в некоторых сплавах и многих металлах (кроме металлов магнитной группы), в пищевых материалах пока не обнаружен. При обработке пищевых материалов в полях СВЧ, возможно, возникает такой тип фазового перехода, но этот вопрос пока мало изучен.

Возможные ошибки в экспериментальном определении теплоемкости пищевых материалов при наличии фазовых переходов и влияние этих ошибок на другие характеристики. Экспериментальные определения теплофизических характеристик — это только узкая область теплофизики, в которой фазовые переходы оказывают существенное влияние на определяемые величины λ , α и c и особенно на их зависимость от температуры, жирности, влажности и других параметров.

Теплофизики и технологи объясняют аномальное возрастание эффективной теплоемкости или эффективной теплопроводности изменением формы связи влаги или наличием фазовых переходов. Для полного описания характера протекающих процессов следует строго делить теплоемкость и теплоту фазовых переходов, и тогда в большинстве полученных значений c и λ не будет аномалий.

Определять теплоемкость необходимо, например, для расчета потребного расхода сушильного агента на сушку или охлаждение, расчета тепла, топлива на сушку, производительности сушилки, правильности выбора вентиляторов. По расчетам В. С. Уколова [25] ошибка в определении теплоемкости пищевого материала в пределах 25—30% приводит к ошибке в расчете расхода сушильного агента и производительности сушилки в пределах 12—18%.

Отклонения в величинах теплоемкости для некоторых продуктов при наличии фазовых переходов достигают 200%, при тепловых расчетах это дает большую погрешность. Поэтому для продуктов, при обработке которых возникают фазовые переходы, надо знать истинную теплоемкость.

Например, в процессе плавления твердых жиров и даже молочного жира в сливках, в процессе таяния льда в замороженных продуктах материалу сообщается тепло (при постоянном давлении), при этом температура тела повышается, начинают плавиться макрочастицы или микрочастицы жира или льда, превращаясь в жидкость, не обладающую правильным строением. Подвод дополнительного количества тепла в процессе плавления приведет к расплавлению того тела (или твердых включений) без повышения температуры, пока не расплавится все тело (или все твердые включения).

Все подводимое при этом тепло идет на разрушение структурной решетки и на разрыв связей, следовательно, это тепло не имеет

отношения к теплоемкости. Температура $T_{пл}$, при которой происходит плавление, и удельная теплота плавления $r_{пл}$ зависят от давления. Плавление можно считать квазистатическим процессом, поэтому при подведении тепла к материалу температура и давление остаются постоянными и материал характеризуется самой малой величиной функции Гиббса G при данных значениях p и T .

Отсюда можно заключить, что минимуму внутренней энергии должен соответствовать минимум теплоемкости.

Ф. Морсом была дана на основании уравнения Клаузиуса — Клапейрона связь между температурой плавления $T_{пл}$ и давлением в виде

$$\frac{dT_{пл}}{dp} = \frac{m T_{пл}}{r_{пл}} \left(\frac{1}{\rho_{ж}} - \frac{1}{\rho_{тв}} \right),$$

где m — масса твердого вещества, кг;

$\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³;

$\rho_{тв}$ — плотность твердого тела, кг/м³.

Это уравнение позволяет вычислить изменение теплоты плавления $r_{пл}$ в зависимости от давления вдоль кривой перехода AB на фазовой диаграмме (рис. 14).

Зная зависимость $r_{пл}$ от T , можно вычислить разность удельных теплоемкостей жидкой и твердой фаз.

Наиболее характерно аномальное влияние фазовых переходов на теплофизические свойства пищевых материалов прослеживается на молоке, сливках и молочном жире. Большой экспериментальный материал по молочным продуктам М. А. Громова [25] в разделе II доказывает, что почти во всех работах допускались неточности в определении теплоемкости. Это подтверждено приводимыми им данными и только в будущем может быть изменено.

М. А. Громовым показано, что теплоемкость обезжиренного и цельного молока практически не зависит от температуры. И нет оснований делать заключение, что увеличение жирности молока может дать резкое возрастание теплоемкости, а многочисленные экспериментальные данные показывают, что имеется аномальное возрастание теплоемкости сливок.

В качестве примера можно привести из книги Г. А. Кука (см. раздел II [128]) и из работ А. Н. Лепилкина (см. раздел II [131—134]) данные об аномальном изменении удельной теплоемкости сливок различной жирности в зависимости от температуры. При температурах, соответствующих процессу плавления частиц жира, взвешенных в сливках, происходит аномальное возрастание теплоемко-

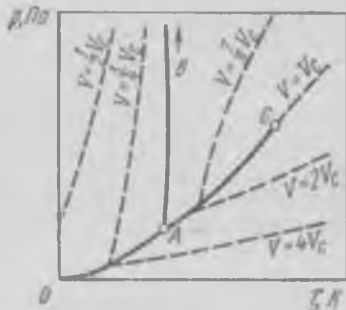


Рис. 14. Фазовая диаграмма для вещества, расширяющегося при плавлении (сплошными линиями указаны фазовые переходы, а пунктирными — процессы при постоянном объеме).

сти, а в последующем — снижение ее при повышении температуры после прекращения процесса плавления. Тепло, затраченное на плавление жира, вошло в величину теплоемкости. Аналогичные аномалии наблюдаются при фазовом переходе, особенно при низких температурах, когда теплоемкость твердого тела пропорциональна T^3 . В экспериментах А. А. Агроскина и Е. И. Гончарова для какао-бобов была получена эффективная и истинная теплоемкость и по их расхождению рассчитаны соответствующие тепловые эффекты.

Нельзя считать достоверным, что с ростом температуры объемная теплоемкость молока уменьшается, она неизменна, а уменьшается удельная теплота плавления шариков жира, так как уменьшается молекулярная связь между микрочастицами, а это не учтено в большинстве опытов.

Следует создать такие методы определения теплоемкости, которые дадут не эффективные ($c_{эф}$) значения теплоемкости, а истинные теплоемкости ($c_{ист}$); тепло, затраченное на фазовый переход, можно учесть.

В большинстве методов, применяемых для экспериментального определения удельной теплоемкости, не разделяется тепло, расходуемое только на нагревание тела и на фазовые переходы, поэтому часто получаются значительно завышенные значения теплоемкости, т. е. не истинное значение теплоемкости $c_{ист}$, а эквивалентное (эффективное $c_{эф}$):

$$c_{эф} = c_{ист} + c_{ф.п.}$$

где $c_{ф.п.}$ — определяется количеством тепла, которое выделяется или поглощается при фазовом переходе единицей массы тела, Дж/(кг·К).

Теплопроводность молочных продуктов с большим содержанием жира с увеличением температуры возрастает по той же причине, что и теплоемкость.

По той же причине противоречивы данные по температуропроводности сливок, так как в большей части опытов коэффициент температуропроводности определяется расчетным путем по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$$

По данным А. С. Гинзбурга, Е. И. Рыжовой и Л. А. Бантыш [5], определявших нестационарным методом теплофизические характеристики при замораживании плодово-ягодных соков, можно сделать вывод о влиянии фазового перехода воды в лед и льда в воду (при оттаивании). С момента начала кристаллизации происходит возрастание коэффициента теплопроводности, и оно тем больше, чем больше воды перешло в лед. Так, на рис. 3 представлена зависимость коэффициента теплопроводности виноградного сока различной концентрации от температуры замораживания.

Этот пример подтверждает вывод о влиянии фазовых переходов на теплофизические характеристики сложных пищевых материалов. Аналогичное явление можно наблюдать (рис. 15) для зависимости $\lambda_{тв}/\lambda_{ж}$ виноградного сока от его концентрации. Отношение теплопроводности твердой фазы к теплопроводности жидкой фазы можно рассматривать как критерий инерционности фазового перехода. Этот критерий является функцией температуры и концентрации раствора. Чем выше скорость замораживания, тем меньше инерцион-

ность фазового перехода и тем выше скачок отношения $\lambda_{тв}/\lambda_{ж}$ [5]. Максимум критерия смещен в сторону малых концентраций.

К фазовым переходам первого рода относится процесс испарения жидкостей. Процесс испарения имеет место во многих технологических процессах при выпечке, сушке, нагреве и т. п. Температура материала остается постоянной, равной температуре испарения $T_{исп}$, до тех пор, пока вся жидкость не перейдет в парообразное состояние за счет подводимой теплоты испарения ($q_{исп}$). При гидротермической обработке пищевых материалов со свойствами капиллярно-пористых тел внутри капилляров происходит фазовый переход — испарение. Температура испарения зависит от давления и характеризуется уравнением Клаузиуса — Клапейрона, которое дается в виде

$$\frac{dT_{исп}}{dp} = \frac{T_{исп}}{r_{исп}} (V_{газ} - V_{жидк}),$$

где v — число молей;

$r_{исп}$ — удельная теплота испарения 1 моля, Дж/кг;

$V_{жидк}$ — объем вещества в жидком виде, м³;

$V_{газ}$ — объем вещества в газообразном состоянии после испарения при $T_{исп}$ и p , м³.

При этом $V_{газ} \gg V_{жидк}$. Удельная теплота парообразования в десятки раз больше теплоты плавления, так как $r_{исп}$ расходуется на разрыв межмолекулярных связей молекул жидкости и на перемещение их в большем пространстве.

Процессы, сопровождающиеся фазовыми переходами, настолько сложны, что без специальных исследований их невозможно построение физической теории.

В применении к холодильной технологии Г. А. Лаковской дана схема фазовых переходов в процессах подвода и отвода тепла для квазистационарных условий замораживания.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЛАЖНОСТИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Классификации методов определения теплофизических характеристик до настоящего времени не существует.

Для различных материалов в разных агрегатных состояниях предлагаются определенные методы, анализируются погрешности,

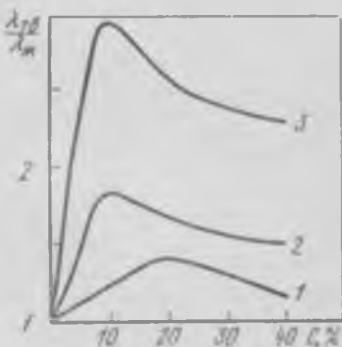


Рис. 15. Зависимость изменения теплопроводности при замораживании от концентрации сока:

1 — при $T=253$ К; 2 — при $T=243$ К; 3 — при $T=233$ К.

даваемые каждым методом, и преимущества использования данного метода (или группы их) к определенным материалам. За последние годы попытки классифицировать методы определения теплофизических характеристик пищевых материалов были сделаны в СССР А. С. Гинзбургом и В. С. Уколовым [25], в ЧССР — М. Адамом с сотрудниками [30, 31] и другими авторами.

В первом издании настоящего справочника [25] приведена схема А. С. Гинзбурга и В. С. Уколова, разработанная на основе фундаментальных работ А. В. Лыкова, Г. М. Кондратьева [10], А. Ф. Чудновского [28], Г. Н. Дульнева [7] и других.



Рис. 16. Схема сравнительного метода определения коэффициента теплопроводности материалов по Христиансену.

В трудах А. В. Лыкова [18], Г. М. Кондратьева [10], А. Ф. Чудновского [28] описаны различные методы определения теплофизических характеристик, часть из них может быть использована для исследования свойств пищевых материалов. Многие классические методы и приборы после многочисленных дополнений и переделок утратили первоначальный вид, но сохранили принципы, положенные в их основу.

В НРБ, ЧССР и других странах за последние годы выполнен ряд работ, в результате которых получены новые значения теплофизических характеристик пищевых материалов.

Так, в НРБ большую работу провели В. А. Милчев [34], К. М. Коларов [33] и др. Данные из этих работ и рекомендуемые в них методы приводятся ниже.

В ЧССР М. Адам с группой сотрудников систематизировал методы определения теплофизических характеристик пищевых материалов и составил справочник, в котором приведены значения теплофизических характеристик многих пищевых материалов.

Обзор методов, которые рекомендованы для определения свойств пищевых продуктов, приведен ниже.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Сравнительный метод Христиансена. Метод Христиансена предназначен для определения коэффициентов теплопроводности жидкостей, основан на сравнении образца материала x с эталоном N , обладающим хорошо изученной и не подвергающейся изменениям теплопроводностью. Идея метода очень проста и ясна из рис. 16.

Образцам материалов придают форму пластин с одинаковыми основаниями с толщинами d_N и d_X , образцы плотно прижимают один к другому, к плоскому нагревателю H (металлической коробке) и плоской (охлаждаемой водой или воздухом комнатной) металлической плите K . Тепловой поток, создаваемый нагревателем, проходит через обе пластины. Если T_1 и T_2 — температуры на горячей

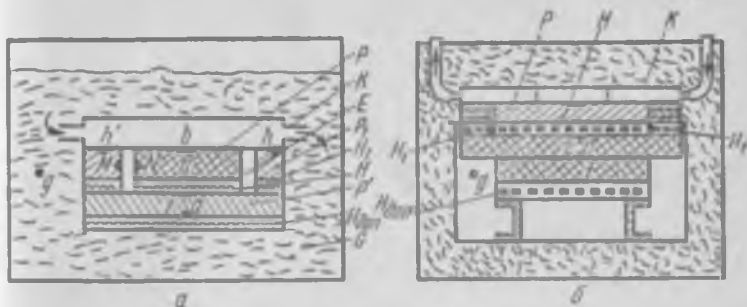


Рис. 17. Кондуктиметр для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляторов по методу одной пластины с охранным кольцом:

a — общая принципиальная схема; *б* — схема прибора М. П. Стаценко; *Е* — узкая кольцевая прослойка — воздушная или заполненная очень легким теплоизоляционным материалом; *Г* — легкий теплоизоляционный материал; *a, b, h, h', e, d, f, g* — места расположения спаев термопар.

и холодной сторонах этой двухсоставной пластины. T^* — температура в плоскости их соприкосновения, то плотность теплового потока можно определить по формуле

$$q = \frac{T_1 - T^*}{P_x} = \frac{T^* - T_2}{P_N}$$

а отсюда вытекает расчетная формула метода

$$P_x = \frac{d_x}{\lambda_x} = \frac{T_1 - T^*}{T^* - T_2} P_N \quad \text{или} \quad \lambda_x = \frac{T^* - T_2}{T_1 - T^*} \lambda_N \frac{d_x}{d_N},$$

где P_x и P_N — тепловые сопротивления, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Дж}$.

Так как P_N известно (материал нормальный), то для определения P_x достаточно измерить температурные разности: $T_1 - T^*$ и $T^* - T_2$; знать тепловой поток нет необходимости, отпадает потребность и в охранным кольце.

Метод одной пластины с охранным кольцом. Идея этого метода основана на тепловом режиме твердого тела простейшей формы. В качестве такого тела выбрана пластина исследуемого материала. На одной ее стороне устанавливают нагреватель постоянной мощности, а на другой — холодильник, устроенный так, что он в единицу времени отнимает одно и то же количество тепла q с единицы поверхности. Пусть температура на горячей и холодной сторонах пластины будет T_1 и T_2 , тогда q можно определить по формуле

$$q = \lambda_{\text{ср}} \frac{T_1 - T_2}{d},$$

где d — толщина пластины, м;

$\lambda_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента теплопроводности, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_{\text{ср}}$ для большинства случаев можно считать линейной функцией температуры.

На рис. 17, а изображена схема кондуктиметра. При надлежащей регулировке нагрузки нагревателей H , H_1 и $H_{доп}$ можно добиться того, что температура в двух точках M и N , взятых произвольно на боковой поверхности образца P и на боковой поверхности верхней части P_1 охранного

кольца, будет одинакова (точки M и N находятся в одной плоскости, параллельной сторонам образца, т. е. расположены одна против другой). Когда это достигнуто, обмен тепла между боковой поверхностью образца и подогреваемым (см. рис. 17, а внизу) кольцом теплоизолятора P_1 прекратится. Такова схема одного из наиболее совершенных однопластинчатых приборов стационарного теплового потока (P' — слой теплоизоляционного материала, K — охлаждающая камера).

Прототипом кондуктиметра в СССР явился прибор (рис. 17, б), построенный М. П. Стаценко и многократно копированный с большим или меньшим совершенством.

Стационарный метод двух пластин с охранным кольцом. Идея метода понятна из рис. 18, а. Центральный основной плоский нагреватель H окружен с двух сторон двумя тождественными пластинами P_1 и P_2 исследуемого материала.

Система из нагревателя и двух пластин окружена охранным приспособлением, состоящим из кольцевого

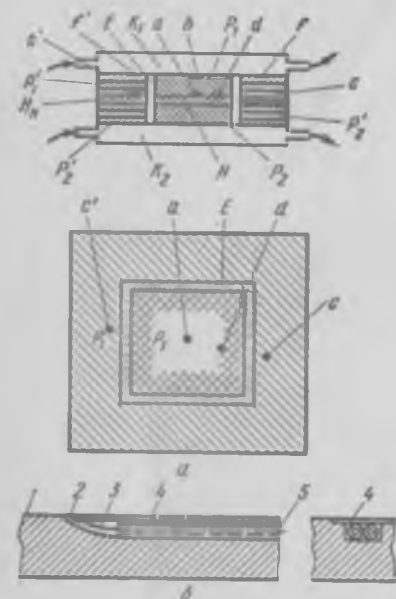


Рис. 18. Кондуктиметр для определения теплопроводности двух пластин с охранным кольцом:

а — принципиальная схема; б — расположение сплав термопар внутри прибора Пенсгена на поверхности массивных коробок (холодная и горячая стороны образцов): 1 — железная плита (толщиной 8 мм); 2 — спай; 3 — термоэлектроды; 4 — покрывная металлическая пластина; 5 — стеклянные трубочки (электромозоляция).

нагревателя H_n и двух одинаковых теплоизоляционных колец P_1' и P_2' . К ним и к пластинам P_1 и P_2 плотно прижаты одинаковые массивные охлаждающие камеры K_1 и K_2 . Буквами a, b, c, d, f, f' на рис. 18, а обозначены спай термопар (места заложения), внизу изображено сечение прибора плоскостью, проходящей через горячую поверхность одной из пластин. Приборы этого типа рассчитаны обычно на образцы квадратной формы.

Метод в качестве стандартного (для $t_{ср} = 293$ К) принят в 1954 г. Международным объединением лабораторий испытаний стро-

ительных материалов (RILEM); он очень близок к советскому стандарту ОСТ ВКС 7458.

Контрольно-измерительная аппаратура изображена на рис. 18, б.

Для определения количества тепла применяется следующая расчетная формула:

$$0,5Q \frac{1}{S} = \frac{1}{2S} \cdot 0,86 IV,$$

где Q — тепло, выделяемое нагревателем, Дж/с;

S — площадь пластины, м²;

I — сила тока, А;

V — мощность источника (поток излучений), Вт;

0,5 — коэффициент, учитывающий, что тепло, выделяемое центральным нагревателем, распределяется поровну между двумя совершенно одинаковыми частями кондуктиметра.

Метод регулярного режима. Экспериментальное определение теплофизических характеристик материалов (продуктов) заключается

в следующем: исследуемый образец, помещенный в жесткую оболочку (если это сыпучий или волокнистый материал), охлаждают или нагревают в среде постоянной температуры θ . При этом наблюдают за изменением температуры T в какой-либо фиксированной точке M тела, отмечают моменты времени τ и соответствующие им показания прибора, предназначенного для измерения температуры T ; измеряют также температуру среды θ .

Измерение T и θ можно заменить измерением разности $T - \theta = \delta$.

Если по данным этих наблюдений построить полулогарифмический график охлаждения или нагревания, откладывая по оси абсцисс τ , а по оси ординат $\ln \delta$ (рис. 19), то его часть AB , соответствующая регулярному режиму, будет прямой, уравнение которой согласно основному закону регулярного режима (первого рода) будет

$$\ln \delta = -m\tau + g(x, z).$$

Если опыт проведен правильно, то $\ln \delta$ — линейная функция времени (точки размещены на прямой), а угловой коэффициент ее и есть темп охлаждения m , взятый со знаком минус.

Взяв на прямой какие-нибудь две точки A_I и A_{II} с координатами τ_I , $\ln \delta_I$ и τ_{II} , $\ln \delta_{II}$, по формуле вычислим темп охлаждения m :

$$m = \frac{\ln \delta_I - \ln \delta_{II}}{\tau_{II} - \tau_I}.$$

Для этого достаточно только отметить две точки кривой охлаждения и два момента времени.

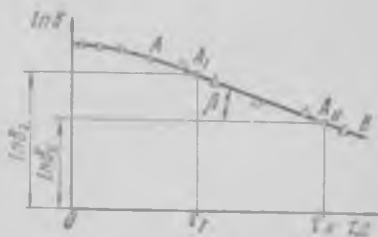


Рис. 19. Экспериментальное определение темпа регуляторного охлаждения (или нагревания) системы.



Рис. 20. Схема метода шара:

F — фланцы, соединяющие в одно целое два полушария, образующие наружную шаровую металлическую оболочку; *H* — электронагреватель; *P* — исследуемый материал; *S* — внутреннего металлическая оболочка; *S'* — внешние полушария; *M*₁, *M*₂ — места заложения спаяв термопар.

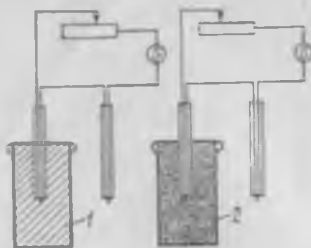


Рис. 21. Цилиндрический λ -калориметр:

1 — цилиндр из металла с известной теплоемкостью (латуни); *2* — образец исследуемого материала в виде цилиндра, одинакового по внешним размерам с цилиндром *1*, или жесткая металлическая оболочка, внутри которой помещен исследуемый материал.

Метод шара. Для определения коэффициента теплопроводности порошкообразных, сыпучих и некоторых волокнистых материалов применяют метод шара. Идея метода ясна из рис. 20. Электрический нагреватель *H* помещен внутри металлического полого шара *S*; concentрично с ним расположена шаровая металлическая оболочка *S'*, а пространство между ней и внутренним шаром заполнено исследуемым материалом. В точках *M*₁ и *M*₂, расстояние которых от общего центра шаров *S* и *S'* будет *R*₁ и *R*₂, находятся спаяв термопар для измерения температур *T*₁ и *T*₂ в этих точках. Тогда средний коэффициент теплопроводности между температурами *T*₁ и *T*₂ будет найден по формуле

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) Q^*}{T_1 - T_2},$$

где Q^* — полное количество тепла, выделяемое электронагревателем в единицу времени, Дж/с;

*D*₁ и *D*₂ — диаметры шаров, чаще всего *D*₁ = 0,12 ÷ 0,15 м, *D*₂ = 0,25 ÷ 0,30 м.

Метод λ -калориметра. λ -калориметр (рис. 21) применяется для определения теплопроводности, он основан на втором методе регулярного режима.

В λ -калориметре характер изменений температуры образца сравнивают с эталоном при теплообмене в воздушном термостате.

Метод «двух точек». Метод двух точек получил распространение для изучения свойств пищевых материалов. Теплопроводность определяется по температуре, измеренной в двух различных точках образца. Выбор положения термодатчиков не связан с определенными осями.

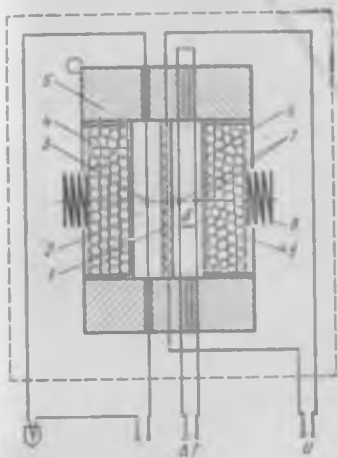


Рис. 22. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности рыбных продуктов в вакууме:

1 — плоский электрический нагреватель; 2 — образец продукта; 3 — термопара; 4 — холодильник; 5 — пенопласт; 6 — сетка; 7 — термопары; 8 — пружина; 9 — сетка.

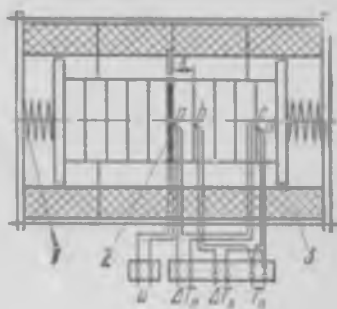


Рис. 23. Схема calorиметрического устройства для определения теплофизических характеристик нестационарным методом.

Метод, применяемый для определения теплопроводности сублимированных продуктов. Теплопроводность сублимированного судака (фаршированного) определялась В. В. Поповым [22] в вакууме методом пластины при стационарных условиях теплообмена. В качестве холодильника в экспериментальной установке использовался слой водяного льда, который при подводе тепла в области давлений ниже давления тройной точки воды сублимировался при определенной температуре, зависящей только от давления в вакуумной камере.

После достижения в системе нагреватель — образец — холодильник стационарных температурных условий вычисляли коэффициент теплопроводности исследуемого продукта. Численное значение коэффициента теплопроводности относили к температуре продукта, средней по толщине образца.

Принципиальная схема установки изображена на рис. 22 (пунктиром показана вакуумная камера). Плоский электрический нагреватель 1 размещен между двумя одинаковыми образцами продукта 2, имеющими форму дисков диаметром $50 \div 60 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $15 \cdot 10^{-3}$ м. К каждому образцу с противоположной от нагревателя стороны плотно прижимают ванночку со льдом — холодильник 4. Она представляет собой цилиндрическую обечайку с дном из мелкой латунной сетки 6. Измельченный лед насыпают в ванночку слоем толщиной $20 \cdot 10^{-3}$ м и закрывают жесткой подвижной сеткой 9. При уменьшении количества льда в процессе опыта (за счет его сублимации) сетка 9 под действием пружины 8 перемещается внутри ванночки, постоянно обеспечивая хороший контакт в системе нагреватель — образец — холодильник.

Перепад температур ΔT в образце на некотором слое толщиной δ измерялся дифференциальной хромель-копелевой термопарой 7, а средняя температура образца — термопарой 3. Вторичным прибором при измерении температур был универсальный потенциометр лабораторный УПЛ-60-2 с нуль-гальванометром М-21. Переключателем ПМК на потенциометр подавались сигналы от той или иной термопары. Питание на нагреватель поступало от сети через стабилизатор напряжения СНБ-200 и автотрансформатор ЛАТР. Мощность N , потребляемая нагревателем, фиксировалась показывающим ваттметром.

Кольцо из пенопласта 5 являлось тепловой изоляцией боковых поверхностей образцов, что позволяло в первом приближении считать температурное поле в испытуемых образцах плоским. Поэтому коэффициент теплопроводности λ [в Вт/(м·К)] определяли по формуле

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta T},$$

где q — удельный тепловой поток, Вт/м².

При наличии двух одинаковых образцов с площадью поверхности S (в м²) удельный тепловой поток (в Вт/м²), создаваемый нагревателем, равен

$$q = \frac{N}{2S},$$

тогда

$$\lambda = \frac{N\delta}{2S\Delta T}.$$

Экспериментальная установка (В. В. Попова) содержала вакуумную камеру, в которой подвешивалось калориметрическое устройство (на специальных кронштейнах), собранное по схеме рис. 22 для стационарного метода или рис. 23 для нестационарного метода.

Давление в камере поддерживалось постоянным с помощью вентили на вакуум-проводе и при необходимости регулировалось впуском атмосферного воздуха через осушительный патрон. Для измерения давления использовались вакуумметры: ртутный с запаянным коленом и термопарный ВТ-3 в сочетании с лампой ЛТ-2.

Мощность нагревателя в калориметрическом устройстве изменялась автотрансформатором и контролировалась ваттметром. Термо-э. д. с., возникающая в датчиках и термопарах, измерялась потенциометром. На описанной экспериментальной установке В. В. Поповым определялись теплофизические характеристики сублимированных продуктов также нестационарным методом в пределах температур от 253 до 278 К. Для этого в экспериментальной установке менялось только калориметрическое устройство и соответственно расчетные уравнения.

Схема калориметрического устройства для нестационарного метода основана на теории А. В. Лыкова и практической реализации А. Б. Вержинской.

Схема калориметрического устройства дана на рис. 23. Плоский электрический нагреватель 2 расположен между двумя полуограни-

ченными стержнями, которые составлены были из дисков фаршированной рыбы.

Контакт между дисками и нагревателем обеспечивался пружинами 1. Кольца 3 из пенопласта являются теплоизоляционным каркасом калориметрического устройства.

Практически величины ΔT_n и ΔT_x измеряли двумя дифференциальными термопарами (см. рис. 23), горячие спай которых (а и b) помещали соответственно у нагревателя и на расстоянии x от него, а холодные (с и d) — в таком сечении стержня, в котором начальная температура T_0 за время опыта не изменялась.

По графикам и соответствующим формулам находят теплофизические характеристики различных рыбных продуктов.

Теплопроводность сублимированных гелей некоторых пищевых продуктов определялась Г. Саравакосом и М. Пилсуортом [38] стационарным методом пластины. Им были определены теплопроводности картофельного крахмала, желатина, пектина, глюкозы, клетчатки, яичного белка. Значения даны во второй части книги.

Схема их экспериментальной установки дана на рис. 24. Особенность метода в том, что он осуществлен для вакуума.

К. Б. Гисина и Л. Н. Новиченок [7] определяли теплопроводность сублимированных биопрепаратов зондовым методом непосредственно в процессе сублимационной сушки в интервале температур от 247 до 293 К.

Теплопроводность рыбных фаршей при температурах от 293 до 353 К и нормальном давлении определялась методом игольчатого зонда в опытах С. В. Симовьяна и И. Т. Исеровича [23].

В исследуемый продукт погружали зонд — стальной капилляр с внешним диаметром 1 мм и длиной 110 мм (рис. 25). В капилляр

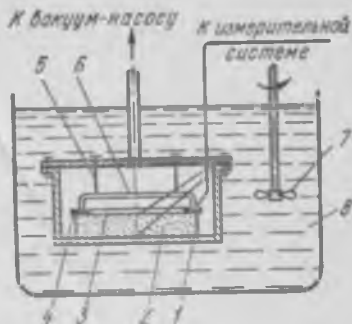


Рис. 24. Схема установки для экспериментального определения теплопроводности (Г. Саравакос [38]):

1 — холодная пластина; 2 — образец; 3 — горячая пластина; 4 — охранный кольцо; 5 — винт; 6 — охранный щит; 7 — мешалка; 8 — масляная ванна.

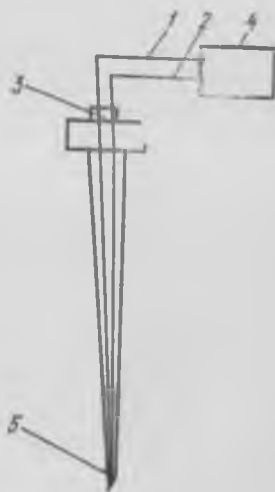


Рис. 25. Схема игольчатого зонда:

1 — медная проволока; 2 — константановая проволока; 3 — эпоксидная смола; 4 — контрольно-измерительные приборы; 5 — охранный корпус терпары (типа полых иглы).

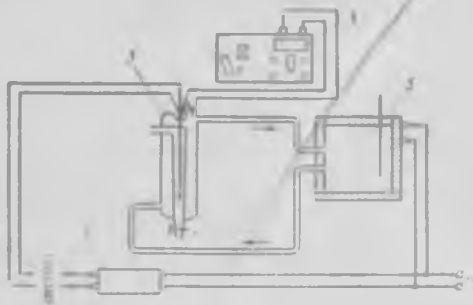


Рис. 26. Схема установки В. А. Милчева для определения теплопроводности:

1 — ЛАТР; 2 — автотрансформатор; 3 — прибор Филиппова; 4 — потенциометр; 5 — термостат.



Рис. 27. Прибор Филиппова:

1 — масло; 2 — исследуемая жидкость; 3 — вода из термостата.

были заключены термометр сопротивления и нагревательная проволока.

По характеру распределения температуры в фарше определяли его теплопроводность.

Метод Л. П. Филиппова, применяемый для определения теплопроводности жидких пищевых продуктов и материалов. В. А. Милчевым для пищевых материалов был применен метод Л. П. Филиппова [27], который можно отнести к относительному методу коаксиальных цилиндров. На рис. 26 и 27 изображены схемы опытной установки и прибора Филиппова. Исследуемой жидкостью заполняют цилиндрический слой между внутренней и внешней стеклянными трубками. Во внутренней трубке диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $80 \cdot 10^{-3}$ м помещают нагревающий элемент, который намотан бифилярно вокруг изолированной термопары медь-константан. Внутреннюю трубку заполняют маслом, а внешнюю — водой с постоянной температурой. Один спай термопары находится в трубке с маслом, а другой — в воде, образуя дифференциальную термопару.

Разность температур в слое исследуемого кукурузного экстракта, применявшегося в опыте с повышением температуры в водяной рубашке прибора, изменялась обратно пропорционально теплопроводности жидкости.

Искомую разность температур в слое исследуемого раствора измеряют как э. д. с. дифференциальной термопары посредством потенциометра с точностью до 0,01 мВ.

При заданной температуре воды в водяной рубашке прибора и постоянном напряжении нагревателя V э.д.с. Δe дифференциальной термопары определяет коэффициент теплопроводности исследуемой жидкости. Вид этой зависимости устанавливают после градус-

рования прибора. Для этого $\Delta\epsilon$ жидкостей сопоставляют с известным коэффициентом теплопроводности.

Для градуирования прибора используют две жидкости: дистиллированную воду и глицерин. Коэффициенты теплопроводности этих жидкостей неоднократно проверены по абсолютным методам, поэтому считаются достоверно известными.

Экспериментальная установка для измерения коэффициента при помощи прибора Филиппова сравнительно проста, и λ определяется достаточно быстро с точностью 3—5%.

Методика проведения опытов по определению λ состоит в следующем. Исследуемую жидкость засасывают в пространство между двумя стеклянными трубками, после чего кран в нижней части прибора закрывают. В термостате 5 (см. рис. 26), соединенном с водяной рубашкой прибора, обеспечивается заданная температура. Коэффициент λ определяют при помощи потенциометра 4, измеряющего э. д. с. дифференциальной термопары. Опыты проводились после 30-минутной выдержки, по получении заданной температуры в термостате 5. Напряжение на нагревателе поддерживалось автотрансформатором 2. Экспериментальные данные коэффициента теплопроводности кукурузного экстракта с концентрацией сухих веществ (СВ) 10, 20, 30, 40 и 50% были получены для различных температур.

Метод, применяемый для определения теплопроводности при помощи изотермического источника тепла. В. С. Волькенштейн [3] применила метод с изотермическим источником тепла (рис. 28) для определения теплоемкости c и коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a веществ.

Образец материала 1 в виде пластины большой температуропроводности и малой толщины с одной стороны соприкасается с неограниченным в направлении теплового потока эталоном 2 с известными термическими характеристиками, с противоположной — с источником тепла 3 постоянной температуры. Нагревателем может служить плоский сосуд, через который пропускают воду при постоянной температуре. В качестве эталона применяют сухой песок с известными теплофизическими характеристиками. Измеряют температуру нагревателя T_n , затем ключ 4 переключают, ставят нагреватель 3 на пластину и одновременно включают секундомер с двумя стрелками; через несколько десятков секунд останавливают секундомер и одновременно регистрируют соответствующие деления шкалы по гальванометру.

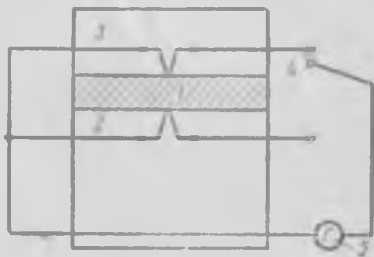


Рис. 28. Схема прибора для определения теплофизических характеристик:

1 — образец исследуемого материала; 2 — эталон; 3 — источник тепла с постоянной температурой; 4 — переключатель; 5 — гальванометр.

Теплофизические характеристики: коэффициент температуропроводности a и теплопроводности λ вычисляют при помощи формул:

$$a_m = \frac{R^2}{4z_0^2 \tau_0}, \quad \lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{a_0}} \cdot \frac{1+a}{1-a} \sqrt{a_m};$$

$$a = \frac{\lambda_0 \sqrt{a_0} - \lambda_0 \sqrt{a_m}}{\lambda_m \sqrt{a_0} + \lambda_0 \sqrt{a_m}},$$

где R — толщина образца (пластины), м;
 λ_m, λ_0 — соответственно коэффициенты теплопроводности образца и эталонного материала, Вт/(м·К);
 a_m, a_0 — соответственно коэффициенты температуропроводности образца и эталонного материала, м²/с;
 τ — время измерения температуры, с;
 z_0 — аргумент интеграла вероятности Гаусса, находится по специально построенным графикам.

В работе приводится метод измерения температуропроводности и теплоемкости веществ. На основе исследования процесса нагревания образца вещества в паровом калориметре Бунзена можно определить его удельную теплоемкость и коэффициент температуропроводности. Прибор рекомендуется для технических исследований. Для вычисления коэффициента температуропроводности материала можно применить номограмму. Продолжительность процесса измерения отдельных параметров составляет около 10 мин.

Р. Ф. Скаковский и В. А. Масликов [24] показали, что при определении теплофизических характеристик подсолнечной мятки методом В. С. Волькенштейн при температуре выше 233 К трудно выполнить начальные условия, поэтому нужен метод, при котором начальные условия не влияют на точность определения. Таким является метод плоской пластины с применением высокочувствительного датчика теплового потока для определения коэффициента теплопроводности материала λ , относимого к средней температуре t .

λ -прибор конструкции Геращенко позволяет найти непосредственным измерением все величины, необходимые для определения λ . Тепловой поток q измеряется датчиком теплового потока, толщина образца δ — встроенным в прибор индикатором с точностью до 10^{-5} м, разность температур Δt , температура поверхности нагревателя t_n и холодильника t_x — дифференциальной комбинированной хромель-алюмелевой термопарой. Датчик позволяет значительно уменьшить размеры образца, отказаться от охранных устройств, сократить время опыта до 30—50 мин. Погрешность измерений в λ -приборе не превышает $\pm 5\%$.

На рис. 29 изображена принципиальная схема λ -прибора.

Пластину испытуемого материала 3 помещают между плоским электронагревателем 2 с регулируемой мощностью и выравнивающей плитой диаметром 10^{-1} м, изготовленной из высокотеплопроводного материала 4, и холодильником 9 с проточной термостатированной жидкостью. Для исследования сыпучих материалов применяли кольцо 1 из маслостермостойкой резины с внутренним диаметром 90 мм. Оно служит для формования и герметизации камеры, в которой находится сыпучий материал. Спаи термопары 7 заделаны в плите 4 и пластине 5 в непосредственной близости к поверхностям стыка с

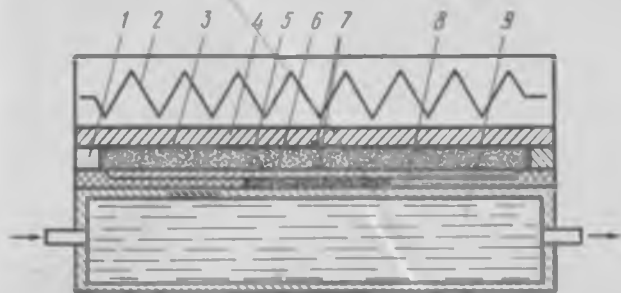


Рис. 29. Схема прибора для определения теплопроводности подсолнечной мятки:

1 — кольцо из маслостертойстой резины; 2 — плоский электронагреватель; 3 — испытуемый материал; 4 — выравнивающая плита; 5 — пластина; 6 — датчик; 7 — спай термопар; 8 — слой эпоксидной смолы; 9 — холодильник.

материалом. Пластину 5 и датчик 6 заливают эпоксидной смолой 8, вследствие чего образуется контакт с холодильником. Высокая чувствительность датчика позволяет фиксировать малые величины q и определять λ в достаточно узком интервале температур (1—3 К) между противоположными поверхностями образца, не нарушая поля влажности образца. Диапазон тепловых потоков, измеряемых датчиком, достаточно велик, что создает возможность при фиксированной средней температуре определять теплопроводность плохих проводников тепла. Термическое сопротивление датчика невелико и не вносит существенных искажений в поле теплового потока.

Коэффициент теплопроводности λ [в Вт/(м·К)] определяется по формуле

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_d}{\Delta t} K_d \delta,$$

где ε_d — сигнал датчика, мВ;

K_d — коэффициент датчика, получаемый при градуировке его на радиационном стенде, Вт/(м²·мВ);

$$K_d = \frac{q}{\varepsilon_d} = 68.$$

Электрическая схема λ -прибора изображена на рис. 30. Напряжение на нагреватель подается от сети через стабилизатор напряжения С-09, автотрансформатор ЛАТР и показывающий ваттметр W. Мощность, подаваемую на нагреватель в интервале температур от 303 до 363 К, изменяли от 2 до 7 Вт. Разность температур нагревателя и холодильника не превышала 3 К.

Экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности. А. С. Панин и В. Д. Скверчак [12, 21] разработали экспресс-метод для определения коэффициента теплопроводности пастообразных и мелкодисперсных материалов, основанный на учете теплоинерционных свойств термопары. Метод позволяет быстро определить коэф-

коэффициент теплопроводности материала непосредственно в процессе его термической обработки. При всем многообразии зондовых методов ни один из них не позволяет определить теплофизические характеристики непосредственно в ходе технологического процесса.

Экспериментальные исследования показали, что темп нагревания (охлаждения) термодпары, мгновенно помещенной в материал, зависит от его свойств. Это послужило основой экспресс-метода определения коэффициента теплопроводности λ .

Теория метода основана на решении следующей краевой задачи. Сферическое твердое тело, изготовленное из идеального проводника с температурой T_0 , помещают в неограниченную среду с температурой $T_c \neq T_0$. Охлаждение (нагревание) тела происходит за счет теплопроводности. Задача состоит в определении температуры тела как функции времени. Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial [rT_1(r_1\tau)]}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 [rT_1(r_1\tau)]}{\partial r^2}$$

при $\tau > 0$, $|r| > R$.

Краевые условия: $T_1(r, 0) = T_0$; $T_2(0) = T_0$;

$$\lambda_1 = \frac{\partial T_1(R_1\tau)}{\partial r} = \frac{c_2 m_2}{F_2} \frac{\partial T_2(\tau)}{\partial \tau};$$

$$T_1(R_1\tau) = T_2(\tau); \quad T_1(\infty, \tau) = T_c;$$

$$\frac{\partial T_1(\infty, \tau)}{\partial r} = 0,$$

где T_1 и T_c , T_2 и T_0 — соответственно текущая и начальная температуры исследуемой среды и зонда, К;

r — текущая координата, м;

m_2 — масса королька термодпары, кг;

F_2 — площадь поверхности королька термодпары, m^2 ;

R — радиус зонда, м;

a_1 — коэффициент температуропроводности исследуемой среды, m^2/c .

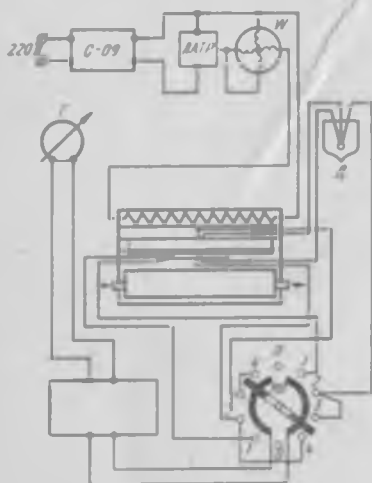


Рис. 30. Электрическая схема А-прибора:

Д — сосуд Дьюара; Г — гальванометр.

Решение уравнения методом Лапласа дает $a_1 = \frac{R^2}{SK}$ и $\lambda_1 = \frac{\beta}{S}$, где $\beta = \frac{R^2}{m}$; S — площадь, ограниченная кривой $\theta = f(\tau)$; θ — безразмерная температура.

$$\theta = \frac{T_c - T_2(\tau)}{T_c - T_0}; \quad K = \frac{3c_1\rho_1}{c_2\rho_2}; \quad m = \left(\frac{c_2\rho_2}{3} \right)^{-1},$$

где ρ — плотность материала, кг/м³;
 $c_1\rho_1$ и $c_2\rho_2$ — массовые теплоемкости среды и зонда, Дж/(м³·К).
 Определение λ проводится в два этапа:
 градуируют термодатчик, т. е. определяют постоянную β ;
 при известном β и площади S , ограниченной кривой $\theta = f(\tau)$, которая характеризует прогрев термопары при быстром погружении ее в исследуемую среду, определяют значения λ_1 глицерина, кварцевого песка и других материалов.

Погрешность метода обусловлена погрешностью определения площади S , которая зависит от класса точности регистрирующего прибора, погрешности измерения ординаты ΔT , на диаграммной ленте самопишущего прибора и погрешности численного интегрирования. При использовании в качестве регистрирующего прибора цифрового милливольтметра в комплекте с ЦПУ (цифropечатающим устройством) погрешность в определении обуславливается только классом точности прибора и погрешностью численного интегрирования, которая зависит от времени быстрого действия ЦПУ.

Кроме того, необходимо, чтобы диаметр электродов термопары был намного меньше диаметра ее королька. А. С. Паниным и В. Д. Скверчаком проведены дополнительные опыты по определению теплофизических характеристик теста в процессе выпечки с ИК-энергopодводом.

Выпечка булочек дала возможность определить ТФХ в динамике процесса. Определение проводилось усовершенствованным экспресс-методом.

Метод наиболее близок к динамическим методам и в настоящее время применен к комплексному определению теплофизических характеристик вязких, жидких, пастообразных и мелкодисперсных материалов (мармелад, мука, крахмал и др.) [12].

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Метод адиабатического калориметра. Прибор с испытуемым образцом материала находится в термозащитном цилиндре и под вакуумным колпаком. При помощи термопары и гальванометра, фотоэлемента и усилителя, от которого питается нагреватель образца, поддерживается равенство температур образца и защитного цилиндра. Температура испытуемого образца материала и сила тока, проходящего через электронагреватель, регистрируются самописцами, на основании чего определяется удельная теплоемкость материала. Этот метод применен для определения теплоемкости пищевых материалов.

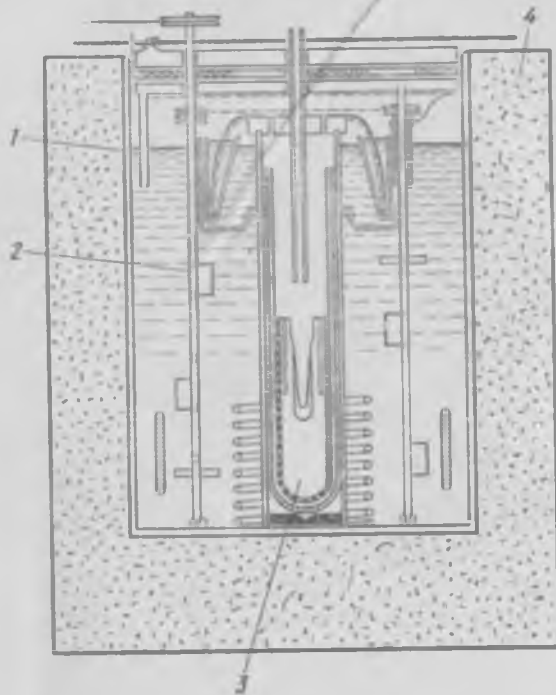


Рис. 31. Схема установки для определения теплоемкости продукта (материала) методом смешения:

1 — калориметр; 2 — мешалка; 3 — сосуд для исследуемого материала; 4 — изоляция.

Метод дифференциального микрокалориметра. Для измерения теплоемкости плохих проводников тепла применяется дифференциальный микрокалориметр Кальве. Установка состоит из двух одинаковых микрокалориметров. Один из них предназначен для испытуемого образца материала, а другой — для воды одинаковой массы m . Показания дифференциальных термопар записываются регистрирующим прибором.

Этот метод можно применять для определения теплоемкости материалов не только при высоких, но и при низких температурах.

Для определения удельной теплоемкости в области низких температур методом непосредственного нагрева применяется калориметр, который состоит из двух однородных металлических цилиндров, входящих один в другой. Зазор между цилиндрами заливают парафином. Для нагрева образца в него помещена электронагревательная проволока, которая одновременно может служить и термометром сопротивления. Иногда для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду применяют вакуум.

При определении теплоемкости порошковых материалов вместо

сплошного металлического цилиндра берут полый металлический цилиндр. В него помещают испытуемый материал в виде порошка, внутрь которого вводят электронагреватель, используемый одновременно для измерения температуры.

Метод смешения. Удельную теплоемкость материала можно определить методом смешения, предложенным Рихманом. Метод смешения заключается в следующем: образец материала, предварительно нагретый до определенной температуры, охлаждают в калориметре (рис. 31). На основании теплового баланса находят среднюю теплоемкость образца материала. Недостатком этого метода является то, что для определения удельной теплоемкости исследуемого образца непосредственному измерению подлежит только 0,02 теплового эффекта, остальные 0,98 теплового эффекта передаются деталям калориметра. Эта часть эффекта определяется вычислением по данным, не отличающимся высокой точностью. Несмотря на существенные недостатки, метод смешения является наиболее распространенным методом определения средней и истинной теплоемкостей различных материалов.

Уравнение для определения средней удельной теплоемкости имеет вид

$$c = \frac{(M_{\text{ж}}c_{\text{ж}} + q)(T_2 - T_0)}{M(T_1 - T_2)},$$

где T_1 — температура исследуемого тела до начала опыта, К;

T_0 — начальная температура калориметра, К;

T_2 — конечная температура всей калориметрической системы, включая поправки на теплообмен, К;

M — масса исследуемого тела, кг;

$M_{\text{ж}}$ — масса калориметрической жидкости, кг;

q — количество тепла, необходимое для нагревания всей калориметрической системы на 1 К (за исключением калориметрической жидкости), Дж/К;

$c_{\text{ж}}$ — средняя удельная теплоемкость жидкости калориметра в интервале температур $T_2 - T_0$, Дж/(кг·К).

Минимальное значение интервала температур $T_1 - T_2$ для определения средней теплоемкости составляет 288—298 К. Значение интервала температур $T_2 - T_0$ должно быть 2—3 К.

Метод смешения применялся для определения удельной теплоемкости сухого чайного листа и многих пищевых продуктов и материалов.

Сравнительный метод. К сравнительным методам определения удельной теплоемкости материалов можно отнести метод микрокалориметра, основанный на регулярном тепловом режиме. На рис. 32 изображена схема экспериментальной установки для определения теплоемкости пищевых материалов методом микрокалориметра. Установка включает два цилиндрических стакана диаметром $20 \cdot 10^{-3}$ м и высотой $62 \cdot 10^3$ м, изготовленные из латуни. Один из них служит для эталонного материала, второй — для исследуемого образца материала (порошка или жидкости). Стаканы снабжены крышками. Материал в воздушно-сухом состоянии при наполнении стаканов укладывается.

Для измерения температуры образца и эталона применены медь-константановые термопары, подключаемые к зеркальным гальванометрам. Во время опыта микрокалориметры помещают в сушильный



Рис. 32. Схема установки для измерения теплоемкости методом регулярного режима:

1 — исследуемый материал; 2 — микрокалориметр; 3 — эталон; 4 — воздушный термостат-холодильник; 5 — зеркальный гальванометр.

шкаф-термостат с терморегулятором. Температура воздуха в термостате изменяется в пределах $\pm 0,05$ К. В одном термостате микрокалориметр с образцом нагревают, в другом его охлаждают. Разность температур в термостатах поддерживалась в пределах 2—3 К.

Из наблюдения над регулярным охлаждением микрокалориметра с эталонным материалом и микрокалориметра с исследуемым образцом материала определяются темпы охлаждения. Если известны коэффициент температуропроводности a и масса исследуемого образца материала, можно вычислить удельную теплоемкость материала c_m в Дж/(кг·К) по формуле

$$c_m = \left(1 - \frac{mR^2}{8a}\right) \left(\frac{Fm_s c_s}{mF_s} - c'\right),$$

где c' — теплоемкость оболочки, Дж/К;

c_s — теплоемкость калориметра из эталонного вещества, Дж/К;

R — внутренний радиус сосуда, м;

m — темп охлаждения сосуда с исследуемым материалом, с;

m_s — темп охлаждения сосуда с эталонным материалом, с;

F — площадь поверхности образца, м²;

F_s — площадь поверхности эталона, м².

Если требуется небольшая точность определения удельной теплоемкости материала, то коэффициент температуропроводности можно не определять, а ограничиться приблизительной оценкой этой величины.

Точность определения удельной теплоемкости этим методом $\pm 5\%$.

Для определения удельной теплоемкости применяют стеклянные цилиндрические сосуды.

Методом сравнительного охлаждения образца и геометрически подобного эталона путем снятия кривых охлаждения во времени проводят определение удельной теплоемкости образца материала.

Удельную теплоемкость материала [в Дж/(кг·К)] вычисляют по уравнению

$$c_m = \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = c_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau},$$

где c_m , c_s — теплоемкость образца и эталона, Дж/К;

T_m , T_s — температура образца и эталона, К;

τ — время, с.

Этот метод применим для больших значений критерия Био.

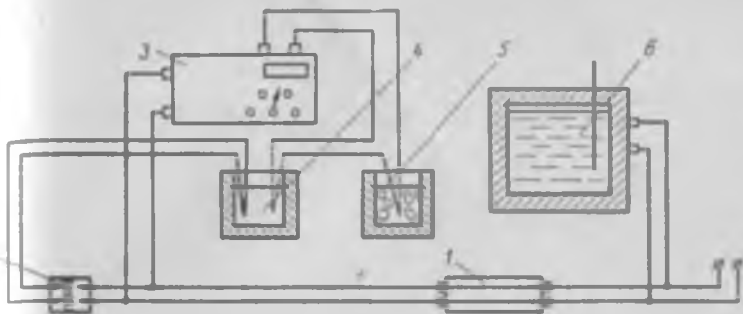


Рис. 33. Схема установки для определения теплоемкости кукурузного экстракта:

1 — стабилизатор напряжения; 2 — ЛАТР; 3 — потенциометр; 4 — сосуд с резистором; 5 — сосуд со льдом; 6 — термостат.

Калориметрический метод. Для определения удельной теплоемкости кукурузного экстракта с В. А. Милчев применил калориметрический метод. Были использованы два сосуда Дьюара, один из которых заполнен льдом, а другой — исследуемой жидкостью — кукурузным экстрактом. В сосуды помещали термодатчики, соединенные последовательно с потенциометром и показывающие абсолютную разность температур ΔT исследуемой жидкости относительно 273 К льда. Схема опытной установки изображена на рис. 33. В сосуде с раствором кукурузного экстракта был помещен электрический нагреватель, напряжение которого регулировалось автотрансформатором. Для получения устойчивого напряжения, подаваемого к нагревателю, перед автотрансформатором включен стабилизатор напряжения.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

Методы регулярного режима. Большое распространение для измерения коэффициента температуропроводности различных материалов получил первый метод регулярного режима при помощи акалориметра, предложенный Г. М. Кондратьевым [10] и его учениками. Акалориметр представляет собой металлическую оболочку, в которую на период измерения коэффициента температуропроводности помещают образцы порошковых материалов.

Для определения коэффициента температуропроводности первым методом регулярного режима используют термостат, позволяющий поддерживать постоянную температуру, при условии, что коэффициент теплоотдачи $\alpha \rightarrow \infty$. Для выполнения последнего условия применяют в качестве среды жидкость, в которую помещают приспособление для активного перемешивания ее, или опыт проводят при температуре плавления, затвердевания или кипения термостатного вещества, тогда нет необходимости в перемешивании вещества.

Основными частями установки являются: термостат, акалориметр, дифференциальная термопара, секундомер.

Акалориметр с исследуемым материалом и заделанной в нем термопарой, нагретый до определенной температуры, погружают в термостат и наблюдают за изменением температуры в период установления регулярного режима. Продолжительность опыта около 1 ч.

Можно найти коэффициент температуропроводности материала методом двух точек — третьим методом регулярного режима.

Приборы, применяемые для этого метода, могут быть сферической, цилиндрической и пластинчатой формы. На рис. 34 изображена схема прибора сферической формы.

Отношение температур в двух любых точках образца материала при регулярном режиме не зависит от времени — это является основой метода.

Опыт можно вести как в условиях естественной, так и в условиях вынужденной конвекции воздуха.

Коэффициент температуропроводности тела методом двух точек определяют по формуле

$$a = \Phi m,$$

где m — темп охлаждения, К/с;

Φ — величина, учитывающая форму и размер тела.

Метод применим для измерения коэффициента температуропроводности различных материалов при относительно низкой и высокой температуре.

Если тело охлаждается в среде с постоянной температурой при условии, что коэффициент теплоотдачи является достаточно большим по величине, то для периода регулярного режима график охлаждения тела (в полулогарифмических координатах) получается в виде прямой. По этому графику можно найти показатель охлаждения m ,

соответствующий так называемому регулярному режиму и подчиняющийся уравнению

$$\Delta T = Au \exp(-mt),$$

где ΔT — разность между температурой в какой-либо точке испытуемого тела и постоянной температурой окружающей среды, К;

u — функция координат;

A — постоянная, зависящая от начального распределения температуры, функция координат.

По формуле $a = \Phi m$ можно найти коэффициент температуропроводности исследуемого образца материала. Как уже упоминалось, приборы могут быть цилиндрической формы. Общая схема установ-

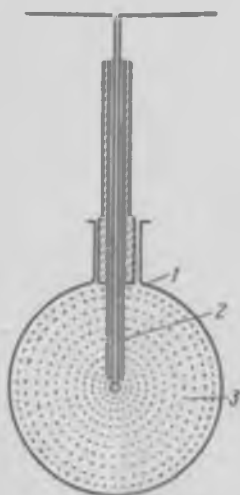


Рис. 34. Схема прибора сферической формы для определения температуропроводности методом регулярного режима (диаметр шара 0,5 м):

1 — металлическая оболочка; 2 — термопара; 3 — исследуемый материал.

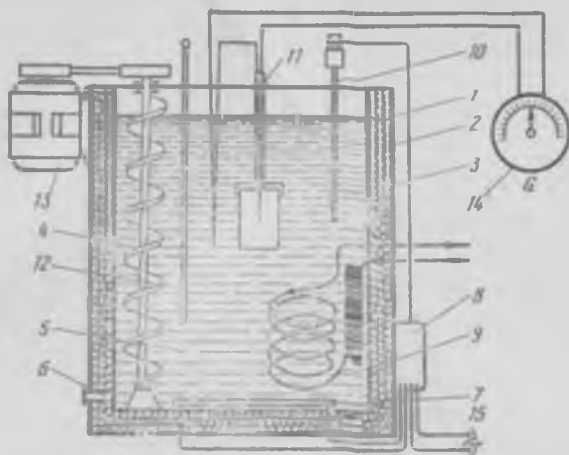


Рис. 35. Схема установки для определения температуропроводности, примененная К. Коларовым к исследованию свойств молочных продуктов:

1 — цилиндрический сосуд; 2 — изоляция; 3 — внешний сосуд; 4 — гальванометр; 5 — термореле; 6 — змеевик для охлаждения; 7 — нагреватель; 8 — электрическая сеть; 9 — вентиль; 10 — термостатирующая жидкость; 11 — термометр; 12 — шнековая мешалка; 13 — электродвигатель; 14 — калориметр; 15 — контактный термометр.

ки для определения коэффициента температуропроводности методом регулярного режима изображена на рис. 35. Этот метод применен К. М. Коларовым для определения a у молочных продуктов и томатных паст.

А. В. Лыков предложил метод определения коэффициента температуропроводности влажных материалов при нагревании испытуемого образца с постоянной скоростью. При этом для шара

$$a = \xi \frac{R^2 - r^2}{6(T_s - T)};$$

для цилиндра

$$a = \xi \frac{R^2 - r^2}{4(T_s - T)};$$

для плиты

$$a = \xi \frac{R^2 - x^2}{2(T_s - T)};$$

где ξ — коэффициент, учитывающий скорость нагревания;

T_s — температура поверхности испытуемого образца, К;

T — температура в любой точке испытуемого образца материала с координатой x или r , К.

Этот метод применен А. С. Гинзбургом для определения коэф. фициента температуропроводности a теста-хлеба.

В Московском инженерно-физическом институте были проведе- ны определения коэффициента температуропроводности изоляцион- ных и строительных материалов в зависимости от температуры путем

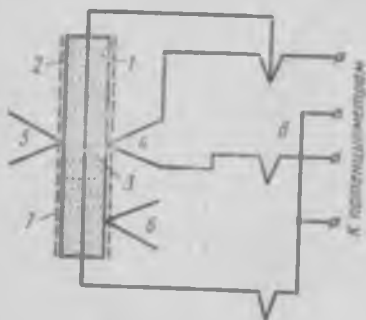


Рис. 36. Схема установки для определения температуропро- водности:

1 — исследуемый материал; 2 — латунная трубка; 3—6 — термопа- ры; 7 — электронагреватель; 8 — переключатель.

измерения температуры нагре- ваемого или охлаждаемого об- разца материала в двух точ- ках. Для этого исследуемый образец материала (рис. 36) помещали в латунную трубку длиной 0,22 м и диаметром 0,044 м, закрывающуюся с тор- цов латунными крышками. Вдоль оси трубки и на стенке размещали термопары. Трубка снаружи имела нихромовый электронагреватель с авто- трансформаторным регулято- ром тока. Для определения коэффициента температуропро- водности материалов во время опыта измеряли температуру в центре образца материала и разность температур ΔT между стенкой и центром образца в зависимости от времени. При этом для определения коэффи-

циента температуропроводности использовались опытные данные T_0 и ΔT , для которых справедливо условие

$$\frac{dT_0}{d\tau} < \frac{d\Delta T}{d\tau}.$$

Расчетная формула имеет вид:

$$a = \frac{R^2 d}{4 \Delta f d\tau} \left(T_0 + \frac{\Delta T}{4} \right),$$

где a — коэффициент температуропроводности образца материала, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ — время, с;

R — радиус цилиндра, м.

Погрешность определения температуропроводности этим мето- дом оценивается приблизительно 3—3,5%.

Этот прибор можно применить также и для определения коэф- фициента температуропроводности материала по методу нагрева с постоянной скоростью.

Зондовый метод. В. З. Богомолов и А. Ф. Чудиновский [28] для комплексного измерения теплофизических характеристик материалов применили пластинчатый зонд.

Для определения теплофизических характеристик этим методом предварительно нагретую металлическую пластину (рис. 37) (или металлическую коробку с подогретой водой) погружают в исследу-

мый материал. Применяют также металлическую пластину, нагреваемую кратковременно электрическим током тотчас же после погружения ее в исследуемый материал. Параллельно пластине на некотором расстоянии от нее вводят дифференциальную термопару или термометр. «Холодный» спай дифференциальной термопары вводят в исследуемый материал в таком месте, где за время опыта температура не меняется. Для определения коэффициента температуропроводности применяют расчетные формулы:

$$a_m = \frac{x^2}{2\tau_{\max}};$$

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{ср}} \left(-\frac{x^2}{4a_m \tau} \right)}{2c_V F \sqrt{\pi a_m \tau}}$$

где ΔT — повышение температуры на расстоянии x от пластины по прошествии времени τ от момента погружения пластины в материал, К;

F — площадь пластины, м^2 ;

$\tau_{\max}$ — время, прошедшее от начала опыта до момента достижения максимума температуры на расстоянии x от пластины в направлении, нормальном к ее поверхности, с;

Q — количество тепла, переданное источником тепла окружающей среде, Дж.

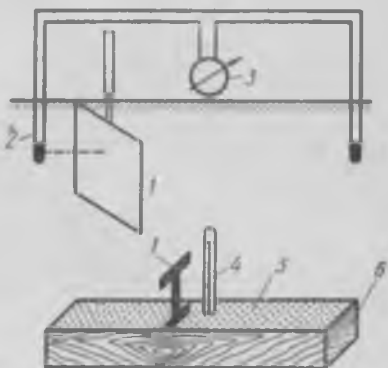


Рис. 37. Схема установки для определения теплофизических характеристик:

1 — пластина-зонд; 2 — термопара; 3 — гальванометр; 4 — термометр; 5 — исследуемый материал; 6 — камера для исследуемого материала.

Для определения коэффициента теплопроводности измеряют температуру пластинчатого зонда при поддержании расхода энергии постоянной и определенной мощности $b = \lambda c_p$ на нагревание зонда. В этом случае применяются расчетные уравнения

$$\lambda_m = \sqrt{b a_m}; \quad c_{mPm} = \sqrt{\frac{b}{a_m}}.$$

Длительность опыта составляет несколько минут.

Этот способ комплексного измерения теплофизических характеристик материалов может привести к значительным ошибкам, потому что расчетные уравнения получены на основании решения уравнения теплопроводности для однородной среды без учета теплофизических свойств материала, из которого изготовлен прибор. Недостатком является также необходимость ввода термометра в исследуемый материал.

ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОГО ИЛИ ПЛОСКОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Метод линейного источника тепла. Импульсные методы определения теплофизических характеристик основаны на существовании мгновенного источника тепла (линейного или плоского), выделяющего конечное количество тепла в заданной точке неограниченного тела за определенный промежуток времени $\tau_{\text{мгн}}$. Метод мгновенных источников тепла широко представлен работами Лыкова А. В. [17, 18], Чудновского А. Ф. [28] и др. [31, 32, 33].

Закономерности распределения нестационарных температурных полей, созданных действием мгновенного источника тепла, определяются решением двумерного уравнения теплопроводности для случая действия мгновенного источника тепла в неограниченном теле.

Решение указанной задачи для случая линейного источника тепла позволяет определить значение максимума избыточной температуры [20] $\Delta T_{\text{max}} = T(r_0, \tau_{\text{max}}) - T_0$, соответствующее определенному моменту времени

$$\tau = \tau_{\text{max}},$$

где τ_{max} — время достижения максимальной температуры, с;

r_0 — расстояние от линейного источника, м;

ΔT_{max} — максимальная избыточная температура, К;

T_0 — начальная температура, К.

Математические преобразования дают расчетные формулы для определения коэффициентов a и λ :

$$a = \frac{r_0^2}{4\tau_0} \varphi_a,$$

где τ_0 — время действия мгновенного источника тепла, с;

$$\lambda = \frac{q_L}{4\pi\Delta T_{\text{max}}} \varphi_\lambda,$$

где q_L — удельный тепловой поток на единицу длины, т. е. количество тепла, выделяемого ежесекундно единицей длины линейного мгновенного источника тепла, Вт/м².

Величины φ_a и φ_λ однозначно зависят от аргумента, принимающего значения от 0 до 1 и равного:

$$\tau_0 = \frac{\tau_0}{\tau_{\text{max}}}.$$

где τ_{max} — время достижения температурного максимума ΔT_{max} , с.

Значения величин φ_λ , φ_a , φ_λ в зависимости от параметра τ_0 даны в табл. I-1.

Таблица 1-1

Значения величин φ_λ , φ_a , φ_λ в зависимости от параметра φ_0

φ_0	φ_λ	φ_a	φ_λ	φ_0	φ_λ	φ_a	φ_λ
0,01	0,0037	0,0109	0,0012	0,46	0,2302	0,6359	0,0763
0,02	0,0074	0,0202	0,0025	0,47	0,2374	0,6565	0,0787
0,03	0,0113	0,0305	0,0037	0,48	0,2449	0,6776	0,0813
0,04	0,0151	0,0408	0,0049	0,49	0,2523	0,6992	0,0837
0,05	0,0188	0,0513	0,0062	0,50	0,2601	0,7213	0,0861
0,06	0,0228	0,0619	0,0075	0,51	0,2678	0,7441	0,0890
0,07	0,0267	0,0727	0,0088	0,52	0,2760	0,7675	0,0917
0,08	0,0307	0,0834	0,0101	0,53	0,2842	0,7916	0,0945
0,09	0,0347	0,0944	0,0115	0,54	0,2927	0,8163	0,0974
0,10	0,0389	0,1055	0,0128	0,55	0,3014	0,8418	0,1004
0,11	0,0429	0,1167	0,0141	0,56	0,3102	0,8681	0,1035
0,12	0,0471	0,1280	0,0155	0,57	0,3195	0,8953	0,1066
0,13	0,0513	0,1395	0,0169	0,58	0,3290	0,9233	0,1098
0,14	0,0556	0,1511	0,0183	0,59	0,3385	0,9523	0,1131
0,15	0,0599	0,1629	0,0197	0,60	0,3486	0,9822	0,1166
0,16	0,0642	0,1748	0,0211	0,61	0,3588	1,0133	0,1201
0,17	0,0687	0,1869	0,0226	0,62	0,3694	1,0455	0,1238
0,18	0,0732	0,1991	0,0241	0,63	0,3803	1,0789	0,1276
0,19	0,0777	0,2115	0,0256	0,64	0,3915	1,1137	0,1316
0,20	0,0822	0,2241	0,0271	0,65	0,4033	1,1499	0,1357
0,21	0,0869	0,2368	0,0286	0,66	0,4153	1,1876	0,1399
0,22	0,0916	0,2497	0,0302	0,67	0,4279	1,2270	0,1441
0,23	0,0965	0,2629	0,0318	0,68	0,4408	1,2682	0,1489
0,24	0,1013	0,2762	0,0334	0,69	0,4544	1,3113	0,1537
0,25	0,1062	0,2897	0,0350	0,70	0,4683	1,3566	0,1588
0,26	0,1112	0,3034	0,0366	0,71	0,4829	1,4042	0,1640
0,27	0,1163	0,3173	0,0383	0,72	0,4982	1,4544	0,1696
0,28	0,1214	0,3315	0,0400	0,73	0,5139	1,5074	0,1752
0,29	0,1266	0,3459	0,0417	0,74	0,5306	1,5635	0,1813
0,30	0,1319	0,3605	0,0435	0,75	0,5483	1,6230	0,1878
0,31	0,1373	0,3753	0,0453	0,76	0,5664	1,6861	0,1945
0,32	0,1427	0,3905	0,0471	0,77	0,5858	1,7540	0,2018
0,33	0,1483	0,4059	0,0489	0,78	0,6060	1,8264	0,2094
0,34	0,1540	0,4215	0,0508	0,79	0,6276	1,9043	0,2176
0,35	0,1597	0,4375	0,0527	0,80	0,6503	1,9883	0,2262
0,36	0,1655	0,4537	0,0546	0,81	0,6746	2,0793	0,2355
0,37	0,1714	0,4703	0,0566	0,82	0,7002	2,1784	0,2455
0,38	0,1776	0,4872	0,0586	0,83	0,7283	2,2869	0,2564
0,39	0,1837	0,5044	0,0601	0,84	0,7580	2,4064	0,2682
0,40	0,1900	0,5220	0,0628	0,85	0,7902	2,5389	0,2863
0,41	0,1964	0,5400	0,0649	0,86	0,8249	2,6870	0,2955
0,42	0,2028	0,5583	0,0671	0,87	0,8632	2,8538	0,3113
0,43	0,2095	0,5771	0,0693	0,88	0,9044	3,0436	0,3289
0,44	0,2163	0,5962	0,0716	0,89	0,9508	3,2624	0,3490
0,45	0,2233	0,6159	0,0739	0,90	1,0020	3,6178	0,3714

Примечание. φ_λ , φ_a — линейный импульсный источник; φ_λ , φ_a — плоский импульсный источник.

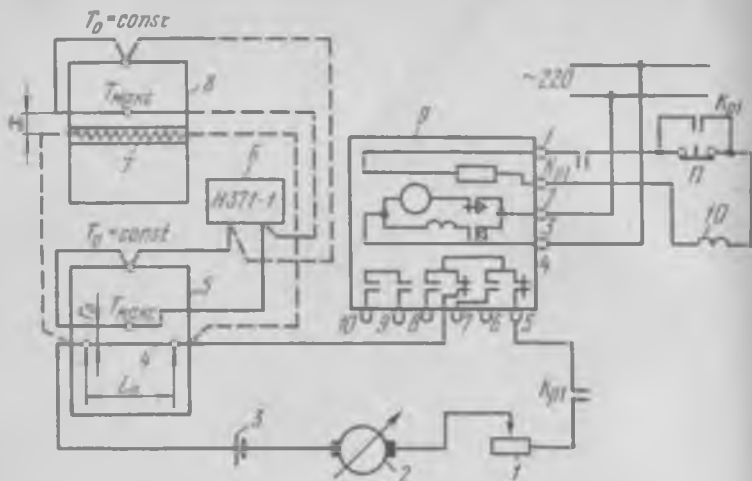


Рис. 38. Принципиальная электрическая схема импульсного метода комплексного определения теплофизических характеристик при использовании линейного и плоского источников тепла:

1 — реостат; 2 — вольтметр; 3 — источник постоянного напряжения; 4 — линейный источник тепла L_0 ; 5 — исследуемый образец; 6 — самописец; 7 — плоский электрический нагреватель; 8 — исследуемый образец для плоского импульсного метода; 9 — реле времени Е-52, регистрирующее продолжительность теплового импульса; 10 — пусковое реле типа РПТ-100

Объемную теплоемкость $c\rho$ находят по формуле $\lambda = ac\rho$:

$$c\rho = \frac{q_L \tau_0}{\pi r_0^2 \Delta T_{\max}} \varphi_{c\rho},$$

где $\varphi_{c\rho} = \frac{\varphi_\lambda}{\varphi_a}$ определяется по табл. I-1.

В табл. I-1 величины φ_λ и φ_a относятся к линейному импульсному источнику, а φ_λ , φ_a — к плоскому импульсному источнику.

На рис. 38 дана электрическая схема импульсного метода определения теплофизических характеристик при наличии линейного или плоского источника тепла. В исследуемом образце размещают линейный источник тепла (проволока диаметром 0,05—0,1 мм с малым температурным коэффициентом сопротивления), а на расстоянии r_0 от него — дифференциальную термopару. Начальная температура образца должна быть равна температуре окружающей среды T_0 , которая на всем протяжении опыта остается неизменной. Выбирается определенная длительность импульса τ_0 , для этого используют реле времени. Зависимость $\Delta T_{\max} = f(\tau)$ регистрируется самописцем с наименьшим пределом шкалы. Промежуточное пусковое реле предназначено для одновременного пуска через его нормально открытые контакты K_{p1} реле времени и подачи мощности на линейный тепло-

вой датчик от источника постоянного напряжения. Схема автоматически срабатывает нажатием кнопки «Пуск» (П). Питание реле времени и пускового реле осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В.

Метод плоского источника тепла. Рассматриваемый метод определения теплофизических характеристик основан на решении одномерного уравнения теплопроводности для неограниченного тела.

Не приводя решения, даем расчетные формулы для теплофизических характеристик:

$$\alpha = \frac{x^2}{2\tau_0} \varphi_a;$$

$$\lambda = \frac{qx}{\Delta T_{\max}} \varphi_\lambda,$$

где x — расстояние от нагревателя до горячего спая термопары, м;
 q — плотность теплового потока, Вт/м².

Объемная теплоемкость определяется формулой

$$c\rho = \frac{2q\tau_0}{x\Delta T_{\max}} \varphi_{c\rho},$$

значения φ_a , φ_λ и $\varphi_{c\rho}$ находятся по таблице [3], где $\tau_0 = \tau_0/\tau_{\max}$, а $\varphi_{c\rho} = \varphi_\lambda/\varphi_a$.

На рис. 38 дана схема для плоского источника тепла в модели неограниченного тела. Плоский источник тепла изготавливается из константановой или манганиновой проволоки диаметром 0,05—0,1 мм, заключенной между двумя слоями изолятора.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ НЕОГРАНИЧЕННОГО ЭТАЛОНА

Методы, разработанные на основе теории А. В. Лыкова его сотрудниками, основаны на уравнениях, применяемых для описания температурных полей тел, плотно соприкасающихся между собой. Одни из них являются неограниченными пластинами конечной толщины, а другие — полупространствами или неограниченными стержнями (без боковой теплоотдачи). Так же, как в зондовых методах, используются источники тепла. Для описания явления целесообразно использовать безразмерный комплекс — критерий Фурье.

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2},$$

где R — определяющий размер одной из частей системы, м; в рассматриваемых методах это будет половина толщины пластины, заложенной между двумя неограниченными стержнями.

Математические выражения, полученные А. В. Лыковым, значительно упрощаются, если ограничиться первыми членами рядов, что допустимо при малых значениях критерия Fo .

В качестве примера приведем метод М. В. Кулакова. Он основан на решении задачи охлаждения образца в форме неограниченной пластины в неограниченной среде при наличии мгновенного плоского источника тепла, находящегося в середине пластины. Условия распространения тепла по обеим сторонам пластины симметричны; окружающие ее прямоугольные параллелепипеды I и II (рис. 39) являются неограниченными эталонами, следовательно, известны все тепловые свойства вещества их, а именно a , λ , c , ρ (обозначения прежние).

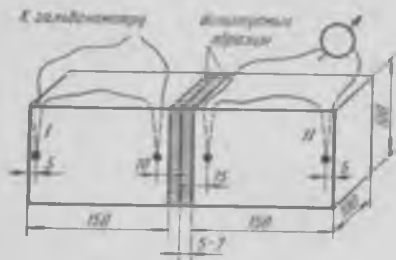


Рис. 39. Схема установки М. В. Кулакова для определения теплопроводности и температуропроводности методом неограниченного эталона:

I и II — блоки из материала эталона (точками на рисунке помечены места расположения спаев термопар).

Если дать мгновенную нагрузку электронагревателю, помещенному в центральной плоскости симметрии системы (см. рис. 39), и измерять температуру $T(x, \tau)$ в какой-либо точке одного из эталонов, расстояние которой x от одной из сторон пластинки известно, в некоторый момент времени $\tau_{\max}$ температура T достигнет максимума, а потом начнет спадать (время отсчитывается от момента сообщения мгновенного теплового импульса нагревателю).

Две пластины, изготовленные из испытуемого материала, должны быть совершенно одинаковыми.

Пусть τ_m известно, x — тоже; затем известно наибольшее значение S_m разности температур $T - T_{\text{нал}} = \theta$, т. е. $S/\tau = \tau_m = S_m$; тогда выводятся следующие расчетные формулы для λ и a испытуемого материала:

$$a = \frac{R^2 a_0}{(\sqrt{2 a_0 \tau_m} - x + R)^2}, \quad \lambda = \frac{2 - \lambda_0 \sqrt{k \Pi}}{\Pi},$$

где буквой k обозначена дробь $k = \frac{a}{a_0}$, а буквой Π — выражение

$$\Pi = \frac{2 \lambda_m S \sqrt{\pi e a \tau_m}}{Q}.$$

Здесь e — основание натуральных логарифмов;

Q — нагрузка, сообщенная нагревателю, — тепловой импульс;

S — площадь соприкосновения нагревателя с образцом исследуемого материала, м^2 .

Уравнение для a позволяет найти искомую температуропроводность, после чего, зная Q и зная S_m и τ_m , вычисляют вспомогательную величину Π и затем λ .

На рис. 39 и 40 представлена схема описанного метода и родственного ему акалориметрического [13]. Цифры указывают размеры

отдельных элементов установки в миллиметрах. Мгновенный источник тепла — тонкая металлическая пластинка, нагреваемая электрическим током в течение 0,5—2,5 с, вводится в плоскость симметричной пластинки, образованной двумя пластинками испытываемого материала. Здесь нет необходимости вводить спай термопара в исследуемый материал. Их вводят только в эталонные параллелепипеды (см. точки на рис. 39).

В. Л. Шевельковым применен метод определения теплофизических характеристик материалов, а также грунтов в лабораторных и полевых условиях, основанный на тепловом контакте прибора (эталона) и исследуемого материала. В этом случае термоизмерителем служит пластинка с электрическим нагревателем мгновенного действия, проложенным в его средней продольной плоскости. После погружения термоизмерителя в исследуемый материал на несколько секунд включается источник тепла. В таком случае в термоизмерителе на любых расстояниях от нагревателя в направлении, перпендикулярном его плоскости, температура повышается, достигает максимума и затем медленно снижается до начальной.

Во время опыта определяются максимальная температура термоизмерителя на некотором определенном расстоянии от нагревателя и время наступления максимальной температуры.

Если известны теплофизические характеристики термоизмерителя λ , a , c , и мощность мгновенного источника тепла b , то можно найти теплофизические характеристики исследуемого материала.

Акалориметрический метод Г. И. Красовской, относящийся к группе методов неограниченного эталона, рассматривается подробно в связи с работой В. А. Милчева [33] (НРБ), который усовершенствовал этот метод, введя понятие определяющей температуры, и построил номограммы, позволяющие быстро рассчитывать все теплофизические характеристики. Метод Г. И. Красовской [13] основан на решении уравнения теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \tau > 0; \quad -R < x < R; \quad (I-1)$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial \tau} = a_0 \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2}; \quad \tau > 0; \quad R < |x| < \infty, \quad (I-2)$$

где T , T_0 — температуры соответственно исследуемого материала и эталона, как функции времени τ и координаты x , К;

a , a_0 — коэффициенты температуропроводности исследуемого материала и эталона, $\text{м}^2/\text{с}$;

$2R$ — толщина слоя исследуемого вещества, м.



Рис. 40. Схема акалориметра Г. И. Красовской:

1 — бетонный акалориметр; 2 — дифференциальная термопара; 3 — гальванометр.

Начальные и граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_s(\infty, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$T(R, \tau) = T_s(R, \tau); \quad \lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = \lambda_s \frac{\partial T_s(R, \tau)}{\partial x}, \quad (1-3)$$

где λ, λ_s — коэффициенты теплопроводности соответственно исследуемого материала и эталона, Вт/(м·К).

Решая уравнения (1-1) и (1-2) при начальных и граничных условиях (1-3) методами операционного исчисления, получают для определения температурного поля пластины

$$\vartheta = \frac{T(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = 1 - \frac{A}{A+1} \sum_{n=1}^{\infty} (-H)^{n-1} \times \\ \times \left[\operatorname{erfc} \frac{2n-1-z}{2\sqrt{\overline{Fo}}} + \operatorname{erfc} \frac{2n-1+z}{2\sqrt{\overline{Fo}}} \right], \quad (1-4)$$

где T_0, T_c — температура окружающей среды и исследуемого материала, К;

для определения температурного поля эталона

$$\vartheta = \frac{T_s(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{1}{A+1} \operatorname{erfc} \frac{z-1}{2\sqrt{\overline{Fo}_s}} - \\ - \frac{2A}{(A+1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-H)^{n-1} \operatorname{erfc} \frac{z-1-2n\sqrt{\frac{a_s}{a}}}{2\sqrt{\overline{Fo}_s}}, \quad (1-5)$$

здесь $\operatorname{erfc} = 1 - \Phi(\sqrt{2a})$,

где $\Phi(a)$ — функция Крампса или интеграл вероятности Гаусса (определяется по таблицам);

$\overline{Fo} = \frac{a\tau}{R^2}$; $\overline{Fo}_s = \frac{a_s\tau}{R^2}$ — критерии Фурье соответственно исследуемого материала и эталона;

$z = \frac{x}{R}$ — безразмерная координата;

$A = \frac{\lambda_s}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{a_s}}$ — критерий, характеризующий тепловую активность эталона по отношению к исследуемому материалу;

$H = \frac{A-1}{A+1}$ — безразмерная величина.

Анализ уравнения (1-5) показывает, что данный бесконечный ряд быстро сходится и при малых значениях Fo_3 с достаточной точностью можно ограничиться одним лишь первым членом ряда. Температурное поле эталона при охлаждении пластины исследуемого материала аппроксимируется выражением

$$\vartheta = \frac{1}{A+1} \operatorname{erfc} \frac{z-1}{2\sqrt{Fo_3}} - \frac{2A}{(A+1)^2} \operatorname{erfc} \frac{z-1+2\sqrt{\frac{a_3}{a}}}{2\sqrt{Fo_3}} \quad (1-6)$$

Уравнение (1-6) имеет максимум во времени. Тогда производная $d\vartheta/d\tau$, приравненная нулю, даст величину критерия Фурье при максимуме

$$Fo_{3m} = \frac{\frac{a_3}{a} + (z-1)\sqrt{\frac{a_3}{a}}}{\ln \left[\frac{2A}{A+1} \left(1 + \frac{2\sqrt{\frac{a_3}{a}}}{z-1} \right) \right]}, \quad (1-7)$$

с другой стороны,

$$Fo_{3m} = \frac{a_3 \tau_m}{R^2}, \quad (1-8)$$

Подставляя уравнение (1-7) в (1-8), получаем максимальную температуру в заданной точке эталона

$$\begin{aligned} \vartheta_m = & \frac{1}{A+1} \operatorname{erfc} \frac{z-1}{2\sqrt{Fo_m}} - \frac{2A}{(A+1)^2} \operatorname{erfc} \times \\ & \times \frac{z-1+2\sqrt{\frac{a_3}{a}}}{2\sqrt{Fo_m}} \end{aligned} \quad (1-9)$$

Зная время достижения температурного максимума в некоторой определенной точке эталона и теплофизические свойства эталона, можно по уравнению (1-5), используя уравнение (1-8), определить коэффициент температуропроводности исследуемого вещества.

При проведении опытов с зерновой массой Г. И. Красовской [13] принималось, что величина $A/(A+1)$ приблизительно равна 1, и для удобства был построен график по уравнению (1-7) в координатной системе $Fo_m = f(a_3/a)$. Зная величину ϑ_m и уже определенный коэффициент a , по уравнению (1-7) определялся коэффициент A , после чего по уравнению

$$A = \frac{\lambda_3}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{a_3}} \quad (1-10)$$

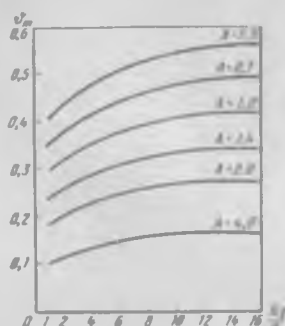
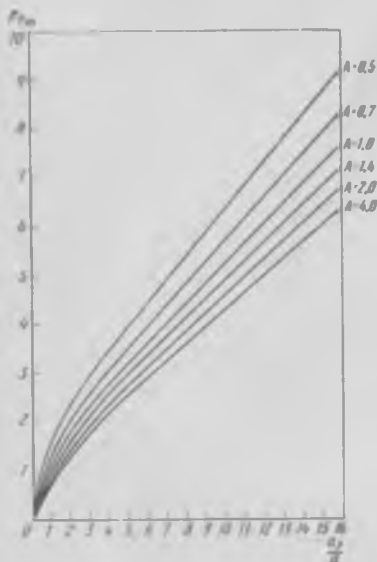


Рис. 42. Номограмма значений θ_m в зависимости от $\frac{a_2}{a}$.

Рис. 41. Номограмма значений Fo_m в зависимости от $\frac{a_2}{a}$ для разных A .

определялся коэффициент теплопроводности исследуемого материала.

Найденное значение A позволяло уточнить величину a .

В. А. Милчевым этим методом были определены теплофизические характеристики растворов кукурузного экстракта с концентрацией сухих веществ: 10, 20, 30, 40 и 50% в температурном интервале 293—373 К. Для уменьшения погрешности им была составлена номограмма значений Fo_m в зависимости от a_2/a не только для значений $A/(A+1)=1$, но и для серии других значений этой величины от 0,5 до 5,0, которая показана на рис. 41. Кроме того, была составлена новая номограмма значений θ_m в зависимости от a_2/a по уравнению (II-9), показанная на рис. 42. Располагая значениями t_m , по формуле (II-8) определялся критерий Fo_m , после чего по первой номограмме (см. рис. 41) определялась величина a_2/a при произвольном значении $A/(A+1)$ (1, 2, 3 и т. д.). Затем, зная из опыта максимальную температуру t_m , а следовательно θ_m и уже найденное отношение a_2/a , по второй номограмме (см. рис. 42) уточнялась величина A . Такое уточнение повторялось при помощи этих двух номограмм несколько раз до тех пор, пока не получилось точное значение a_2/a и A при определенных Fo_m и θ_m . Построенные номограммы существенно облегчают расчет теплофизических характеристик, так как иначе необходимо неоднократно использовать громоздкие формулы (I-7) и (I-9).

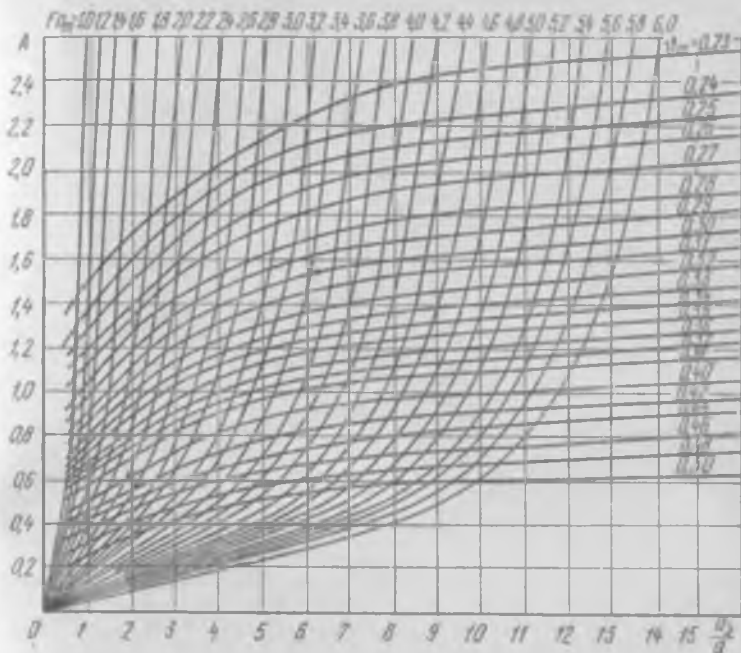


Рис. 43. Общая номограмма значений A в зависимости от $\frac{a_3}{a}$ при постоянных Fo_m и Φ_m .

Для точного определения A и a_3/a как функции Fo_m и Φ_m была построена общая номограмма, показанная на рис. 43, она составлена из номограмм, изображенных на рис. 41 и 42. Новая общая номограмма составлена в координатной системе A как функция a_3/a при параметрах $Fo_m = \text{const}$, $\Phi_m = \text{const}$.

При помощи общей номограммы для определенных значений Fo_m и Φ_m одновременно определяются величины A и a_3/a . Затем по уравнению (I-10) находят коэффициент теплопроводности λ исследуемого вещества. С помощью этой номограммы устраняются неоднократные приблизительные пересчеты при определении величин A и a_3/a .

Метод, предложенный Г. И. Красовской, имеет ряд преимуществ (крайне малая погрешность опыта, определение всех характеристик из одного опыта, возможность проведения эксперимента в широком интервале температур, простота и надежность методики эксперимента). Недостатком метода является отсутствие значения определяющей температуры, к которой можно отнести найденные из опыта коэффициенты λ и a . Этот недостаток пробовал устранить Ю. А. Терентьев [26], который предложил для нахождения определяющей

температуры использовать уравнение температурного поля пластины (I-4). Если предположить, что этот бесконечный ряд быстро сходится и при малых значениях критерия Фурье можно ограничиться его первым членом, то для момента времени $\tau = 0,5\tau_m$ необходимо определить превышение температуры материала при $z=1$ и $z=0$ над температурой окружающей среды. Критерий Фурье рассчитывался по формуле

$$Fo = \frac{0,5a\tau_m}{R^2} \quad (I-11)$$

Окончательно в качестве определяющей температуры T_{0n} выведена формула

$$T_{0n} = T_c + \frac{A(T_0 - T_c) \left[2\operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{Fo}} \right]}{(A+1) \ln \left[\frac{A+1 - A\operatorname{erfc} \frac{1}{\sqrt{Fo}}}{A+1 - 2A\operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}}} \right]} \quad (I-12)$$

Полученная таким образом формула (I-12) включает в себя критерий Fo , взятый не при максимальном значении τ_m (при котором определяется опытно λ и a), а при ориентировочно выбранном времени $0,5\tau_m$. Такой выбор не может гарантировать высокую точность, так как охлаждение исследуемого материала происходит неравномерно и полученная определяющая температура не является в достаточной степени достоверной.

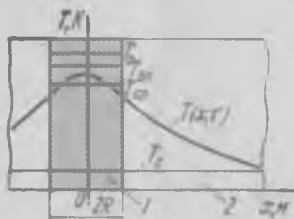


Рис. 44. Схема распределения температуры при охлаждении пластины:

1 — пластина материала; 2 — эталон.

В. А. Милчев ввел определяющую температуру при τ_m и Fo_m , при которых определяются λ и a . На рис. 44 схематично показано распределение температуры по направлению координаты x . Введены следующие обозначения:

безразмерная температура

$$\vartheta = \frac{T(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} \quad (I-13)$$

определяющая температура

$$\vartheta_{0n} = \frac{1 + \vartheta_{cp}}{2} \quad (I-14)$$

где θ_{cp} — среднеинтегральная температура, величина которой может быть найдена:

$$\begin{aligned}\theta_{cp} &= \int_0^1 \theta(z, Fo) dz = \int_0^1 \left\{ 1 - \frac{A}{A+1} \sum_{n=1}^{\infty} (-H)^{n-1} \times \right. \\ &\quad \times \left[\operatorname{erfc} \frac{2n-1-z}{2\sqrt{Fo}} + \operatorname{erfc} \frac{2n-1+z}{2\sqrt{Fo}} \right] \Bigg\} dz = \\ &= 1 - \frac{A}{A+1} \sum_{n=1}^{\infty} (-H)^{n-1} \left[\int_0^1 \operatorname{erfc} \frac{2n-1-z}{2\sqrt{Fo}} + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^1 \operatorname{erfc} \frac{2n-1+z}{2\sqrt{Fo}} \right] dz. \quad (1-15)\end{aligned}$$

Для решения первого интеграла произведена подстановка

$$\xi = \frac{2n-1-z}{2\sqrt{Fo}},$$

при этом

$$\xi = \frac{n-1}{2\sqrt{Fo}} \quad \text{при } z=1 \quad \text{и} \quad \xi = \frac{2n-1}{2\sqrt{Fo}} \quad \text{при } z=0.$$

Для решения второго интеграла сделана подстановка

$$\xi = \frac{2n-1+z}{2\sqrt{Fo}},$$

при этом

$$\xi = \frac{n}{\sqrt{Fo}} \quad \text{при } z=1 \quad \text{и} \quad \xi = \frac{2n-1}{2\sqrt{Fo}} \quad \text{при } z=0.$$

После несложных преобразований получено:

$$\begin{aligned}\theta_{cp} &= 1 - 2\sqrt{Fo} \frac{A}{A+1} \sum_{n=1}^{\infty} (-H)^{n-1} \times \\ &\quad \times \left[\operatorname{erfc} \frac{n-1}{\sqrt{Fo}} - \operatorname{erfc} \frac{n}{\sqrt{Fo}} \right] \quad (1-16)\end{aligned}$$

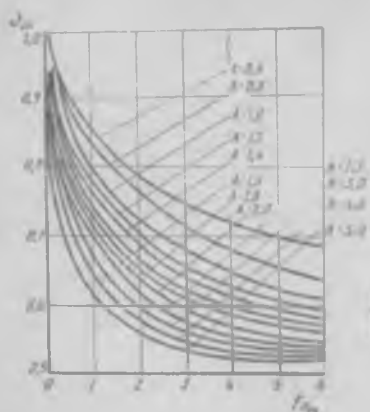


Рис. 45. Номограмма для нахождения ϑ_{on} по значению Fo_m и A .

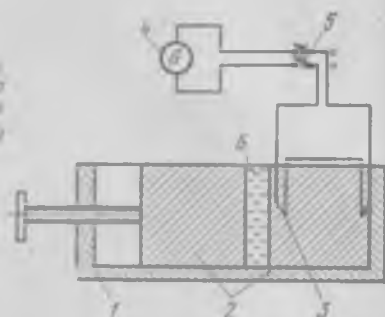


Рис. 46. Схема прибора В. А. Милчева для определения теплофизических характеристик кукурузного экстракта:

1 — изолирующая оболочка; 2 — эталон; 3 — дифференциальная термопара; 4 — гальванометр; 5 — переключатель; 6 — исследуемая жидкость.

и окончательно при Fo_m получено:

$$\vartheta_{on} = 1 - \frac{1}{Fo_m} \frac{A}{A+1} \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1-A}{1+A} \right)^{n-1} \times \\ \times \left[\operatorname{ierfc} \frac{n-1}{\sqrt{Fo_m}} - \operatorname{ierfc} \frac{n}{\sqrt{Fo_m}} \right]. \quad (1-17)$$

Зная, что

$$\vartheta_{on} = \frac{T_{on} - T_c}{T_o - T_c},$$

было получено выражение для определяющей температуры

$$T_{on} = T_c + \vartheta_{on} (T_o - T_c) = T_c + 1 - \frac{1}{Fo_m} \frac{A}{A+1} \times \\ \times \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1-A}{1+A} \right)^{n-1} \left[\operatorname{ierfc} \frac{n-1}{\sqrt{Fo_m}} - \operatorname{ierfc} \frac{n}{\sqrt{Fo_m}} \right] (T_o - T_c). \quad (1-18)$$

Зная T_0 , T_c , F_{om} и A , можно определить T_{on} , причем в зависимости от заданной точности, не ограничиваясь лишь первым членом ряда.

Для удобства по уравнению (1-17) В. А. Милчевым построена номограмма, изображенная на рис. 45. Имея значения F_{om} и A , можно найти величину ϑ_{on} , затем по известным T_c и T_0 по формуле

$$T_{on} = T_c + \vartheta_{on} (T_0 - T_c)$$

определяют искомую определяющую температуру T_{on} .

Для определения теплофизических характеристик кукурузного экстракта В. А. Милчевым был сконструирован прибор, схема которого изображена на рис. 46.

Прибор представляет собой акалориметр из органического стекла, который содержит две плиты размером $82 \times 40 \times 40$ мм, между которыми имеется зазор — щель для исследуемого вещества. Одна из плит неподвижна, а другая может перемещаться при помощи специального винта. Таким образом можно менять толщину щели. На неподвижной плите на расстоянии 10^{-2} и 10^{-1} м установлены две дифференциальные термодпары. По достижении в точке $x = 10^{-2}$ м максимальной температуры опыт прекращался.

Исследуемый раствор кукурузного экстракта наливают в полиэтиленовую бутылочку и помещают в термостат для поддержания необходимой температуры. Затем раствор быстро подают в щель прибора нажатием на упругую бутылочку. Хронометром засекают время достижения (в точке $x = 10^{-2}$ м) максимальной температуры; максимальную температуру измеряют при помощи гальванометра, а также определяют температуру окружающей среды.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

При измерении теплофизических характеристик необходимо определять влажность в соответствии с государственными стандартами. В этом разделе даны выдержки из ГОСТов для определения влажности следующих основных продуктов: хлеба и хлебобулочных изделий, кондитерских изделий, сахара-песка, сахара-рафинада и сушеных фруктов, которые рассматриваются как типичные капиллярно-пористые и кристаллические материалы.

Во многих экспериментальных работах по определению теплофизических характеристик, влажности, плотности авторы не использовали ГОСТов для измерения влажности. Это существенно влияет на характер графических зависимостей теплофизических характеристик от влажности.

Соблюдение стандартов при измерениях влажности позволит с большей достоверностью определять теплофизические характеристики в зависимости от влажности.

Даны несколько методов определения влажности основных групп пищевых материалов: со свойствами кристаллических твердых тел (сахар, сахарный песок) и со свойствами коллоидных капиллярно-пористых тел (хлебобулочные и кондитерские изделия и сушеные фрукты).

Метод определения влажности сахара-песка и сахара-рафинада (по ГОСТ 12570—67). Влажность определяют следующим методом. Около 10 г сахара-песка (или быстро размельченного сахара-рафинада), взятых из отобранной пробы, помещают в чистую высушенную и тарированную бюксу с притертой крышкой. Бюксу закрывают крышкой и взвешивают на аналитических весах. Навеску высушивают до постоянной массы в вакуум-сушилке при 100° С. Допускается также высушивание навески в сушильном шкафу при 105° С.

Высушивание начинают с температуры 50° С, постепенно повышая ее до указанных пределов в течение примерно 30 мин. Первое взвешивание при высушивании в вакуум-сушилке производят через 1,5 ч после достижения 100° С, а при высушивании в сушильном шкафу — через 3 ч. Последующее взвешивание производят через 1 ч после сушки. Постоянная масса считается достигнутой, если разница между двумя взвешиваниями не превышает 10⁻⁶ кг. Перед каждым взвешиванием бюксы с навесками охлаждают в эксикаторе.

Содержание влаги W (в %) вычисляют по формуле

$$W = \frac{(G_1 - G_2) 100}{G_1 - G}$$

где G — масса бюксы, кг;

G_1 — масса бюксы с навеской сахара до высушивания, кг;

G_2 — масса бюксы с навеской сахара после высушивания, кг.

Допускаемые расхождения при параллельных определениях не должны превышать:

при влажности 0,2% и ниже $\pm 0,01\%$

при влажности выше 0,2% $\pm 0,02\%$

Определение влажности хлеба и хлебобулочных изделий (по ГОСТ 21094—75). Для определения влажности хлебобулочных изделий массой 0,2 кг лабораторный образец разрезают поперек на две приблизительно равные части и от одной части отрезают ломоть толщиной 1—3 см, отделяют мякиш от корок на расстоянии около 1 см, удаляют все включения (изюм, повидло, орехи и др., кроме мака). Масса выделенной пробы не должна быть менее 20 г.

Подготовленную пробу быстро и тщательно измельчают ножом или механическим измельчителем, перемешивают и тотчас же взвешивают в заранее просушенных и тарированных металлических чашечках с крышками две навески, по 5 г каждая, с погрешностью не более 0,01 г.

Навеску в открытых чашечках с подложенными под дно крышками помещают в сушильный шкаф. Навески высушивают при температуре 130° С в течение 45 мин с момента загрузки до момента выгрузки чашечек. Продолжительность понижения и повышения температуры до 130° С после загрузки сушильного шкафа не должна быть более 20 мин. Высушивание проводят при полной загрузке шкафа.

В процессе сушки в сушильных шкафах всех марок допускается отклонение от установленной температуры не более $\pm 2^\circ$ С.

После высушивания чашечки вынимают, тотчас закрывают крышками и переносят в эксикатор для охлаждения. Время охлаждения не должно быть менее 20 мин и более 2 ч. После охлаждения чашечки взвешивают.

Для определения влажности хлебобулочных изделий массой 0,2 кг и меньше из середины отобранного лабораторного образца вырезают ломти толщиной 3—5 см, отделяют мякиш от корок и удаляют все включения (изюм, повидло, орехи и др., кроме мака). Масса выделенной пробы не должна быть менее 20 г.

Изделия, влажность которых определяют вместе с корочкой (например, ржаные лепешки, майская лепешка и т. п.), разрезают на четыре примерно равные части (сектора), затем выделяют одну часть от каждого лабораторного образца и удаляют все включения, кроме мака. Масса выделенной пробы не должна быть менее 50 г.

Далее влажность определяют, как было указано выше.

Содержание влаги W (в %) вычисляют по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100,$$

где m_1 — масса чашечки с навеской до высушивания, кг;

m_2 — масса чашечки с навеской после высушивания, кг;

m — масса навески изделия, кг.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений.

Допускаемые расхождения между результатами параллельных определений влажности в одной лаборатории, а также между результатами одновременных определений влажности лабораторных образцов, отобранных из одной и той же средней пробы в разных лабораториях, не должны превышать 1%.

Влажность вычисляют с погрешностью не более 0,5%, причем доли до 0,25 включительно отбрасывают, доли свыше 0,25 и до 0,75 включительно приравнивают к 0,5; доли свыше 0,75 приравнивают к единице.

Определение влажности кондитерских изделий (по ГОСТ 5900—73). Сущность метода заключается в высушивании навески изделия или полуфабриката при определенной температуре и вычислении потери массы по отношению к навеске.

Метод предназначен для изделий, не растворимых или частично растворимых в воде: мучных кондитерских изделий, кексов, полуфабрикатов для тортов и пирожных, мучных восточных сладостей, рулетов, халвы, шоколада и шоколадной глазури, пралине, марципана, помады, молочных конфет, ириса, некоторых сбивных изделий, изделий, содержащих спирт, и т. п.

Для проведения анализа должны применяться весы лабораторные не ниже II класса точности по ГОСТ.

Не более 3 г подготовленного изделия, предварительно тщательно растертого и перемешанного, взвешивают с погрешностью не более 0,01 г в предварительно подготовленной бюксе с палочкой (с песком или без песка в зависимости от вида изделия). Допускается навеска для тортов и пирожных массой не более 5 г.

Определение влаги в печенье, галетах, пряниках, вафельных листах, кексах, полуфабрикатах для тортов и пирожных, мучных восточных сладостях, рулетах, шоколаде, какао-порошке, пралине, марципане и т. п. проводят без песка.

Открытые бюксы с навесками помещают в сушильный шкаф, нагретый до температуры 403 ± 2 К, на уровне и вблизи шарика термометра. При внесении бюксы в шкаф температура в нем немного

понижается, поэтому отсчет времени высушивания производят с того момента, когда термометр покажет 403 К.

Длительность высушивания кондитерских изделий устанавливается следующая:

печенья сахарного, полусахарного, затяжного, сдобного, галет, крекера, вафельных листов — 30 мин;

пряников, кексов, полуфабрикатов для тортов и пирожных, мучных восточных сладостей, рулетов — 40 мин;

остальных — 50 мин.

Если изделие имеет вязкую консистенцию и при перемешивании с песком превращается в комок, то к навеске прибавляют около 1 мл воды, хорошо перемешивают стеклянной палочкой при подогревании на кипящей водяной бане или в сушильном шкафу, доводят до видимой сухости и ставят в сушильный шкаф, обтерев снаружи бюксы.

По окончании высушивания бюксы с навесками неплотно прикрывают крышками, помещают в эксикатор на 30 мин, а затем, плотно закрыв бюксы крышками, взвешивают.

Содержание влаги W (в %) вычисляют по формуле

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100,$$

где m_1 — масса бюксы с навеской до высушивания, кг;

m — масса бюксы с навеской после высушивания, кг;

m — масса навески изделия, кг.

При исследовании влажности кондитерских изделий определение содержания сухих веществ можно производить с помощью рефрактометров (например, марок РЛ, РПЛ и РЛУ), используя термостатирующее приспособление: термостат ТС-13 или бутылку вместимостью около 5 л с нижним тубусом и каучуковой трубкой с винтовым зажимом, подводящей воду к призмам рефрактометра.

Сущность метода заключается в определении процентного содержания сухих веществ в изделии по коэффициенту преломления его раствора.

Метод предназначен для кондитерских изделий и полуфабрикатов, растворяющихся в воде и не содержащих молока, жира, спирта (сахарного драже, карамельной массы, сахарной помады, сахаропаточных сиропов), и для изделий, содержащих не растворимые в воде небольшие примеси растительных тканей (яблочного и желеинового мармелада, пастилы, зефира, а также начинок и корпусов фруктовых, медовых и подобных им конфет).

Примеры расчета содержания сухих веществ и влажности карамельной массы. Пример 1. Карамельная масса изготовлена согласно рецептуре: 100 кг сахара + 50 кг патоки. Навеска карамельной массы 5,03 г. Масса раствора навески 8,79 г. Отсчет по рефрактометру при температуре 22°С 55,9%. Температурная поправка 0,16.

Содержание сухих веществ

$$\frac{(55,9 + 0,16) \cdot 8,79}{5,03} = 97,970\%$$

Поправка по табл. 2 стандарта без учета нарастания редуцирующих веществ равна 0,85.

Содержание сухих веществ в карамельной массе: $97,97 - 0,85 = 97,12\%$.

Влажность карамельной массы: $100 - 97,12 = 2,88\%$.

Пример 2. Карамельная масса изготовлена по рецептуре: 100 кг сахара + 15 кг патоки + 19,3 кг инвертного сиропа с 75% редуцирующих веществ. Навеска карамельной массы 5,23 г. Масса раствора навески 10,77 г. Температура 27°C . Отсчет по шкале рефрактометра 47,1%.

Видимое содержание сухих веществ составляет: $47,1 + 0,56 = 47,66\%$, а в самой карамельной массе без поправок за счет сухих веществ патоки и инвертного сиропа

$$\frac{47,66 \cdot 10,77}{5,23} = 98,14\%$$

Окончательный результат содержания влаги с учетом поправки на патоку и инвертный сироп составит: $98,14 + 0,12 = 98,26\%$ сухих веществ.

Влажность карамельной массы: $100 - 98,26 = 1,74\%$.

Определение влажности сухих фруктов (по ГОСТ 12002—66). Определение производят следующим образом.

Выделенную из среднего образца пробу сушеных фруктов (200 г) освобождают от косточек, веточек, минеральных примесей (кусочков земли, глины, камешков и т. п.) и тщательно перемешивают, после чего сушеные фрукты измельчают на мелкие кусочки размером не более 2 мм в каждом измерении в количестве не менее 50 г.

Измельченные сушеные фрукты во избежание изменения их влажности по мере подготовки помещают в стеклянную банку с плотно пригнанной пробкой. Каждый раз перед взятием навесок пробу необходимо тщательно перемешивать для обеспечения однородности массы.

В чистые, сухие и взвешенные с точностью до 0,001 г бюксы берут две навески (по 5—6 г) измельченных сушеных фруктов (продукт должен быть распределен по дну бюксы ровным слоем). Бюксы закрывают крышками и снова взвешивают с той же точностью. Затем открытые бюксы с навесками помещают в сушильный шкаф и сушат в течение 4 ч при температуре $98-100^\circ\text{C}$, после чего бюксы закрывают крышками и помещают их в эксикатор для охлаждения (металлические бюксы — на 15—20 мин, стеклянные — на 25—30 мин). Охлажденные бюксы взвешивают и по разности между весом навесок до высушивания и весом их после высушивания определяют количество потерянной влаги.

Содержание влаги W (в %) вычисляют по формуле

$$W = \frac{(G - G_1) \cdot 100}{G - G_2}$$

где G — масса бюксы с навеской до высушивания, г;

G_1 — масса бюксы с навеской после высушивания, г;

G_2 — масса бюксы, г.

За содержание влаги длинной партии сушеных фруктов принимают среднее арифметическое двух параллельных определений. Содержание влаги вычисляют с точностью до 0,01%.

Таблица I-2

Сушеные фрукты	Величина навески, г	Температура обезвоживания, °С	Продолжительность обезвоживания, мин
Виноград	3—4	150—152	5
Груша	3—4	150—152	5
Кайса	3—4	150—152	6
Курага			
Урюк			
Чернослив	3—4	150—152	5
Яблоки	3—4	150—152	6

Расхождение между двумя параллельными определениями содержания влаги одного и того же образца не должно превышать 0,3%.

При проведении арбитражного определения обязательно применение основного метода.

Для определения содержания влаги в сушеных фруктах должны соблюдаться приведенные выше режимы (табл. I-2).

Раздел II

Значения теплофизических характеристик и их анализ

1. ОВОЩИ, ПЛОДЫ, ЯГОДЫ И ПРОДУКТЫ ИЗ НИХ

СВЕЖИЕ И ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫЕ ОВОЩИ, ПЛОДЫ И ЯГОДЫ

Свежие овощи, плоды и ягоды. Удельная теплоемкость свежих продуктов не зависит от их вида и определяется влажностью.

Удельная теплоемкость 24 видов овощей влажностью от 96,8% (огурцы) до 61,8% (чеснок) и 14 видов плодов и ягод влажностью от 90,1% (земляника) до 69,9% (абрикосы) была определена в интервале температур 273—293 К. Для указанных продуктов функция $c=f(W)$ описывается формулой [230]

$$c = 1340 + 28,6W, \quad (II-1)$$

где c выражена в Дж/(кг·К).

Расчетная удельная теплоемкость сухих веществ продуктов в формуле (II—1), а также полученная по закону Коппа и Неймана [104] и экспериментальная (см. табл. II-33) различаются незначительно.

Значения удельной теплоемкости продуктов, вычисленные по формуле (II-1) или по эмпирическим формулам (табл. II-1), а также экспериментальные ее значения при $W=66,5 \div 96,1\%$ [260, 391, 389, 105, 422, 72] различаются не более чем на 7%. Поэтому формулу (II-1) рекомендуется использовать для определения удельной теплоемкости свежих овощей, плодов и ягод в интервале $W=62 \div 97\%$.

Таблица II-1

Формулы для определения удельной теплоемкости свежих овощей, плодов и ягод

Продукт	W, %	c, Дж (кг·К)	Источник
Сахарная свекла	70—80	$c = 1547 + 26,38W$	[154]
	70—80	$c = 1382 + 28,0W$	[104]
Овощи, плоды, ягоды	50—100	$c = 1675 + 25,1W$	[389]
	50—100	$c = 1800 + 23,9W$	[391]
Апельсины свежие	—	$c = 1256 + 29,3W$	[350]
Плоды актинидии (свежие)	—	$c = 837 + 33,5W$	[329]
Цитрусовые	0—90	$c = 1453 + 25,16W$	[428]
Грейпфруты	78—88	$c = 837 + 33,8W$	[199]

Теоретические исследования по зависимости $\rho = f(T)$ для свежих продуктов [105], а также экспериментальные данные [230, 389, 230, 391] свидетельствуют, что удельная теплоемкость их несущественно увеличивается с ростом температуры.

Плотность (истинную) свежих продуктов ρ_m (в кг/м³) при $T = 278 \div 293$ К можно вычислить по формуле [104]

$$\rho_m = \frac{267 \cdot 000}{267 - n} \quad \text{или} \quad \rho_m = 1000 + 6,0n, \quad (II-2)$$

где n — содержание сухих веществ, %.

Средняя (физическая) плотность продуктов ρ_ϕ (в кг/м³) меньше истинной (табл. II-2) и определяется как [104]

$$\rho_\phi = \rho_m (1 - \epsilon_n), \quad (II-3)$$

где ϵ_n — степень пористости. Ее значения приведены в табл. II-2.

Таблица II-2

Некоторые физические характеристики овощей, плодов и ягод

Продукт	n, %	ρ_m , кг/м ³	ρ_ϕ , кг/м ³	ϵ_n , %	ρ_ϕ , кг/м ³		ϵ_c , %
		[105]			[146]	[369]	[105]
Капуста белоко- чанная	8,5	730	400	43	—	—	45
Морковь	10	1040	600	42	973—1040	—	45
Лук	13,4	940	600	36	880—920	—	35
Свекла							
столовая	12,9	1053	600	43	—	—	40
сахарная	22,0	1090	650	40	—	—	—
Картофель	20,2	1080	650	40	—	—	40
Томаты	5,3	993	—	—	—	—	—
Баклажаны	5,6	716	410	43	527—641	—	—
Кабачки	5,0	—	—	—	855—917	—	—
Яблоки	13,2	879	500	43	—	750—870	—
Виноград	16,4	1036	600	42	—	—	—
Груши	15,3	1009	—	—	—	980—1000	—
Айва	14,2	892	—	—	—	—	—
Абрикосы	—	950	550	42	—	—	—
Сливы	—	1030	600	42	—	990—1080	—
Персики	—	950	550	42	—	980—1010	—
Крыжовник	—	1040	600	42	—	—	—
Черная смородина	—	1070	680	36	—	—	—
Апельсины	—	—	—	—	—	930—1090	—
Лимоны	—	—	—	—	—	930	—
Вишня	—	—	700	—	—	970—1050	—

Насыпная плотность продукта ρ_n (в кг/м³) равна [104]

$$\rho_n = \rho_\phi (1 - \epsilon_c), \quad (II-4)$$

где ϵ_c — скважистость слоя. Ее значения приведены в табл. II-2.

Насыпная плотность винограда может быть определена по формуле [221]

$$\rho_n = 0,63\rho_c, \quad (II-5)$$

где ρ_c — плотность сока винограда, кг/м³.

Средняя плотность многих видов продуктов, вычисленная по эмпирическим формулам (табл. II-3) и формуле (II-2), которая не учитывает наличие в продуктах воздуха, различается не более чем на 4,5%.

Таблица II-3

Формулы для определения средней плотности овощей

Овощи	$n, \%$	$\rho_{\phi}, \text{кг/м}^3$	Источник
Картофель	17,5—28	$\rho_{\phi} = 998,4 + 4,09n$	[312]
	12—34	$\rho_{\phi} = 1000 + 4,80n$	[230]
Сахарная свекла	20—30	$\rho_{\phi} = 990 + 4,60n$	[104]

Для апельсинов зависимость плотности (в кг/м³) от толщины кожуры (в которой содержится 39,6—46,2% воздуха) описывается формулой [85]

$$\rho = 1071 - 301,8\delta, \quad (II-6)$$

где δ — толщина кожуры, см.

Формула (II-6) справедлива при $\delta = 0,3 \div 0,9$ см.

Таблица II-4

Плотность плодов и их элементов

Плоды	$W, \%$			$\rho, \text{кг/м}^3$			Источник
	плод	мякоть	кожура	плод	мякоть	кожура	
Апельсины	—	—	—	790—980	998—1020	—	[350]
Грейпфруты	83,6	88,2	78,6	820—880	1008	576	[235, 299]

Таблица II-5

Плотность винограда ρ (в кг/м³) [150]

Сорт винограда	Сок ягод	Грозди	Ягоды	Гребни	Семени	Кожица
Рислинг	1075— 1083	1071— 1086	1077— 1087	1037— 1064	1130— 1190	1115— 1130
Саперави	1079— 1091	1080— 1093	1084— 1094	1035— 1053	1120— 1160	1116— 1122

Таблица II-6

Насыпная плотность плодов ρ_n (в кг/м^3) в зависимости от высоты слоя [8]

Плоды	Высота слоя, см				
	15	25	35	45	55
Вишня	714	726	740	752	766
Слива	689	696	703	710	717
Кизил	790	797	805	814	821

Насыпная плотность (в кг/м^3) кислой вишни составляет от 833—848 до 893—942, а сладкой вишни — от 741—765 до 770—798 [358].

Таблица II-7

Плотность овощей, плодов и ягод ρ_0 (в кг/м^3) в среде различных газов [300]

Продукт	Гелий	Азот	Воздух
Дыня медовая	1035	1042	1044
Петрушка	134	152	146
Перец красный	1204	1292	—
Яблоки	913	1047	—
Клубника			
половинки	1452	1381	—
четвертинки	636	646	—
целая малая	842	852	—
целая крупная	1336	1221	—
Банан резаный	1349	1341	1330

Коэффициент теплопроводности [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$] продуктов с повышением влажности увеличивается. Такие данные получены для яблок и томатов [278], а также для свеклы (табл. II-8). В интервале $W=85\div 90\%$ для моркови ($T=293\text{ К}$) справедлива формула [357]

$$\lambda = -1,57 + 0,002W. \quad (\text{II-7})$$

Для моркови сорта Нантская установлено, что коэффициент теплопроводности в ее поверхностном слое меньше, чем в сердцевине (табл. II-9).

Коэффициент теплопроводности продуктовой части капусты составляет 0,14, кочерыги — 0,43 $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [105].

Коэффициент теплопроводности очищенных плодов больше, чем плодов в кожуре (табл. II-10), из-за малого λ кожуры [297].

Таблица II-8

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности свеклы при $T = 289 \text{ K}$

W, %	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$		$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	
	[154]	[104]	[154]	[104]
70	0,426	0,398	11,1	10,5
75	0,456	0,435	11,7	11,3
80	0,491	0,472	12,4	12,1

Таблица II-9

Коэффициент теплопроводности моркови λ [в Вт/(м·К)] при $T = 293 \text{ K}$

W, %	Поверхностный слой	Сердцевина
81,0	0,27	0,33
86,6	0,30	0,40
88,0	0,38	0,44

Таблица II-10

Теплофизические характеристики очищенных и неочищенных плодов

Плоды	W, %	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$	$\epsilon, \text{Вт·с/(кг·м}^2 \times \text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Источник
Апельсины очищенные	85,9	1021	3797	3835	0,55	14,3	[419, 350]
в кожуре	82,0	887	3687	3270	0,48	14,7	[350]
Лимоны очищенные	91,8	930	3965	3687	0,52	14,1	[419]
в кожуре	—	—	3726	—	0,44	—	[428]
Грейпфруты очищенные	90,4	950	3955	3729	0,55	14,8	[419]
в кожуре	83,6	850	3681	3129	0,46	14,7	[299]

С увеличением толщины кожуры (δ), в которой содержится 39—49% воздуха, коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] апельсинов уменьшается [350]:

$$\text{при } \delta = 0,30 - 0,96 \text{ см} \quad \lambda = 0,406 - 0,209 \delta; \quad (\text{II-8})$$

$$\text{при } \delta = 0,30 - 0,77 \text{ см} \quad \lambda = 0,495 - 0,368 \delta. \quad (\text{II-9})$$

С уменьшением толщины кожуры (от 0,96 до 0,30 см) плотность апельсинов повышается (с 791 до 980 кг/м^3), в связи с чем коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] увеличивается [350]:

$$\lambda = -0,524 + 1,02 \rho / 1000. \quad (\text{II-10})$$

Обобщенной формулы, выражающей зависимость $\lambda = f(W)$ и $\lambda = f(\rho)$ для разных видов продуктов, не предложено, так как при одной и той же влажности (или плотности) овощи, плоды и ягоды различаются структурой ткани и пористостью. Так, например, при

$W=94,7 \div 94,4\%$ для баклажанов $\lambda=0,35$, а для томатов — $0,55 \text{ Вт/(м·К)}$ [105]. При $\rho=900 \div 930 \text{ кг/м}^3$ для земляники $\lambda=0,46$, а для персиков — $0,58 \text{ Вт/(м·К)}$ [419].

Коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] слоя лимонеза, уложенных в виде прямоугольного параллелепипеда высотой 14 см, определяется направлением теплового потока и температурным перепадом ΔT по высоте [301]:

при тепловом потоке, направленном вверх,

$$\lambda = 0,240 + 0,0050 \Delta T; \quad (\text{II-11})$$

при тепловом потоке, направленном вниз,

$$\lambda = 0,245 + 0,0005 \Delta T. \quad (\text{II-12})$$

Формулы (II-11) и (II-12) справедливы для $\Delta T=0 \div 24 \text{ К}$.

Таблица II-11

Теплофизические характеристики свежих овощей

Овощи	$T, \text{ К}$	$W, \%$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{с}$	Источник
Картофель	—	70	—	0,63	14,4	[206]
	293	75	986	0,58	15,6	[126]
Свекла	301	89,5	—	0,60	—	[119]
	—	81,5	—	0,61	13,5	[206]
Морковь	301	90	1040	0,60	—	[419]
	—	88,9	—	0,63	15,1	[206]
Репа	297	89,8	1000	0,56	14,3	[419]
Лук	301	87,3	970	0,57	—	[419]
Томаты	281	94,7	990	0,55	13,9	[105]
Кабачки	—	94,4	—	0,60	15,5	[206]
Огурцы	301	95,4	950	0,60	15,0	[119]
Дыня	301	92,8	930	0,57	15,3	[419]
Баклажаны	281	94,4	750	0,35	11,6	[105]
	—	91,7	—	0,37	11,9	[206]
Капуста	281	92	700	0,34	12,2	[105]
Зеленый горошек	273	74,4	1062	0,37	9,1	[290]

Коэффициент теплопроводности овощей [в Вт/(м·К)], плотности которых меньше 1000 кг/м^3 , с точностью 10—15% равен [103]:

$$\lambda = \frac{\rho \Phi}{\rho_m} (0,47 - 0,004 n) + 0,25 \left(1 - \frac{\rho \Phi}{\rho_m} \right). \quad (\text{II-13})$$

Установлено, что коэффициенты тепло- и температуропроводности дефростированной сахарной свеклы после быстрого и медленного замораживания и последующего оттаивания увеличиваются примерно на 6—7% по сравнению с аналогичными коэффициентами свежей свеклы [154].

Коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) свежих плодов с повышением температуры увеличивается.

Для персиков при $T=272\div 300\text{ К}$ [296]

$$\alpha \cdot 10^8 = -9,0 + 0,085 T. \quad (\text{II-14})$$

Для грейпфрутов при $T=277\div 294\text{ К}$ [299]

$$\alpha \cdot 10^8 = 7,52 + 0,034 T. \quad (\text{II-15})$$

Таблица II-12

Теплофизические характеристики плодов и ягод

Плоды и ягоды	W, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	Источник
Яблоки	86,8	880	0,49	14,6	[105]
	84,9	840	0,51	16,0	419
Яблоки зеленые	88,5	790	0,42	14,0	419
Виноград	83,4	100	0,52	13,1	[105]
Земляника	88,8	900	0,46	13,4	419
Груши	87,4	1010	0,51	13,4	[105]
	85,0	85	0,41	13,1	[85]
Айва	85,8	890	0,46	13,6	[105]
Апельсины	58,0	980	0,43	14,6	230
	82,0	—	0,49	—	418
	—	878	0,42	12,2	427
Грейпфруты	—	883	0,40	12,1	230
	84	850	0,46	14,7	299
Бананы	75,7	980	0,48	13,0	419
Персики	88,5	930	0,58	16,8	419
Ананасы	84,9	1010	0,55	14,8	419
Плоды актинидии	84,0	1030	0,43	11,4	[329]

В разных слоях плода коэффициент температуропроводности не одинаков. Для грейпфрутов он равен: в центре плода $8,87 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, в средних слоях $9,70 \cdot 10^{-8}$, в поверхностных слоях $10,60 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ [299].

Бланшированные плоды. Совместная обработка данных по удельной теплоемкости c [в Дж/(кг·К)] бланшированных яблок и груш ($W=89\div 94\%$) позволила рекомендовать формулу, справедливую при $T=293\div 363\text{ К}$ [85]:

$$c = 367 + 30,0 W + 3T - 0,03 TW. \quad (\text{II-16})$$

Удельная теплоемкость продуктов при $T=283\text{ К}$, вычисленная по формулам (II-16) и (II-1), различается не существенно.

Плотность плодов при бланшировании повышается с увеличением продолжительности процесса и ростом температуры греющей среды (табл. II-13).

Плотность долек яблок, бланшированных в воде ($T=363\div 372\text{ К}$) в течение 0—4 мин, которая приведена в [358] и табл. II-13, различается незначительно.

Таблица II-13

Плотность плодов ρ (в кг/м^3) в процессе бланширования [264]

T, K	Продолжительность бланширования, мин									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Яблоки ($\rho = 872 \text{ кг/м}^3$)										
353 (вода)	—	913	—	923	—	965	—	974	—	—
363 (вода)	—	935	—	953	—	962	—	978	—	—
371,5 (вода)	912	923	967	980	—	—	—	—	—	—
383 (пар)	920	918	980	974	—	—	—	—	—	—
Груши ($\rho = 1010 \text{ кг/м}^3$)										
353 (вода)	—	1031	—	1015	—	1055	—	1059	—	1067
363 (вода)	—	1049	—	1053	—	1061	—	1061	—	1062
371,5 (вода)	1030	1043	1048	1053	1065	—	—	—	—	—
383 (пар)	1030	1048	1056	1060	1061	—	—	—	—	—

При бланшировании плотность яблок повышается больше, чем груш (табл. II-13), так как масса их увеличивается (на 2,2—2,7%), в то время как масса груш уменьшается (на 5—10%).

В результате бланширования степень пористости плодов уменьшается (табл. II-14).

Таблица II-14

Плотность и степень пористости плодов [289]

Плоды	Свежие		Бланшированные	
	ρ , кг/м^3	ϵ_n , %	ρ , кг/м^3	ϵ_n , %
Бананы	1014	15,7	1060	6,7
Манго	1043	13,2	1052	10,2

Плотность плодов, например сегментов яблок, особенно заметно повышается, если бланширование осуществляется водяным паром при вакуумировании (табл. II-15).

Таблица II-15

Плотность сегментов яблок при бланшировании в вакууме при $T = 293 \text{ K}$ [326]

p , мПа	101,3	66,9	33,6	3,3	2,7	1,3	0,3
ρ , кг/м^3	896	901	926	969	1018	1034	1030

Плотность яблок и груш при бланшировании существенно повышается, если их вакуумирование проводится в сахарном сиропе (табл. II-16).

Таблица II-16

Теплофизические характеристики плодов [85]

Вид пло-дов и их сорт	Состояние	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	
Яблоки Симиренко	Свежие	840	3801	3193	0,46	14,5
	Бланшированные	924	3810	3520	0,47	13,3
	Вакуумированные	951	3739	3556	0,50	14,0
Бельфлер	Свежие	804	3788	3046	0,45	14,9
	Бланшированные	897	3820	3227	0,45	13,2
	Вакуумированные	946	3753	3550	0,48	13,5
Груши Гимринские	Свежие	1006	3762	3785	0,52	13,7
	Бланшированные	1029	3816	3927	0,52	13,3
	Вакуумированные	1048	3736	3914	0,53	13,5

В результате бланширования и вакуумирования плодов их коэффициент теплопроводности увеличивается (по сравнению со свежими), а коэффициент температуропроводности уменьшается, так как заметно возрастает объемная теплоемкость, например при нагреве до $T=363$ К (табл. II-16).

С ростом температуры плодов при бланшировании значения их ТФХ увеличиваются (табл. II-17).

Таблица II-17

Теплофизические характеристики яблок сорта Симиренко при бланшировании [85]

Интервал нагрева, К	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
293—313	825	3791	0,41	13,1
293—333	838	3795	0,42	13,2
293—343	840	3797	0,44	13,7
293—353	822	3799	0,45	14,4
293—363	834	3801	0,46	14,5
293—367	830	3802	0,50	15,8

Вареные овощи. Удельная теплоемкость свежих и нагретых (от 273 до 373 К) овощей примерно одинакова (табл. II-18).

Удельная теплоемкость овощей [230]

Овощи	Состояние	W, %	c, Дж/(кг·К)
Морковь	Свежая	90	3936
	Вареная	92	3768
Картофель	Свежий	75	3515
	Вареный	80	3643
Белокочанная капуста	Свежая	92	3894
	Вареная	97	4103

Экспериментальные значения удельной теплоемкости вареных овощей (табл. 11-18÷11-21, 11-23) и вычисленные по формуле (11-1) практически не различаются, поэтому формулу (11-1) рекомендуется использовать для определения удельной теплоемкости вареных овощей.

С ростом температуры овощей их коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] увеличивается:
для зеленого горошка [290]

$$\lambda = -0,243 + 0,00224 T; \quad (11-17)$$

для сердцевинки моркови сорта Нантская при $T=298\div 368$ К [357]

$$\lambda = 0,211 + 0,00087 T. \quad (11-18)$$

Коэффициент теплопроводности поверхностного слоя моркови сорта Нантская больше, чем сердцевинки, и при $T=313, 333$ и 353 К соответственно составляет 0,57; 0,59 и 0,60 Вт/(м·К).

Эквивалентные коэффициенты тепло- и температуропроводности многих видов вареных овощей (табл. 11-19), нагрев которых не сопровождается заметным массообменом, примерно такие же, как свежих (см. табл. 11-11), а для капусты белокочанной (нагрев сопровождается заметным массообменом) они больше, чем для свежей.

Таблица 11-19

Теплофизические характеристики вареных овощей

Овощи	W, %	ρ , кг/м ³	ρ , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	Источник
Лук репчатый	85,6	1010	3768	0,50	13,0	[88]
Капуста белокочанная	91,2	940	3936	0,99—1,32	26,9—36,1	[88]
Картофель	81,6	1096	3600	0,62	15,7	[47]
Морковь	90,7	1046	3900	0,61	16,2	[47]
Свекла	87,5	968	3970	0,60	15,9	[47]
Огурцы	96,5	975	4100	0,46	11,5	[46]

Коэффициенты тепло- и температуропроводности измельченных овощей при их нагреве от 283 до 373 К меньше, чем целых [195], в другой работе [64] сделан противоположный вывод. Это противоречие по влиянию измельчения овощей на их ТФХ вызвано, по нашему мнению, тем, что в опытах [195, 64] использовались образцы из разных слоев клубней.

Таблица II-20

Теплофизические характеристики измельченных вареных овощей [195]

Овощи	Состояние	W, %	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Картофель	Целый	77,8	1095	3601	0,61	15,4
	Измельченный	78,5	985	3622	0,60	17,5
Морковь	Целая	83,5	1080	3743	0,59	11,6
	Измельченная	83,5	985	3743	0,62	17,0
Свекла	»	80,5	985	3641	0,62	17,3

Коэффициенты тепло- и температуропроводности моркови при одинаковой температуре существенно зависят от того, из какой части клубня взят образец (табл. II-21).

Таблица II-21

Теплофизические характеристики моркови при T=373 К [357]

Часть моркови	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Сердцевина	970	3782	0,51	13,9
Поверхностный слой	1000	3921	0,60	15,3

Эквивалентные коэффициенты тепло- и температуропроводности овощей зависят от способа варки (табл. II-22).

Коэффициенты тепло- и температуропроводности клубней свеклы в процессе варки в кипящей воде не зависят от их формы (опыты проводились с образцами в виде шаров, цилиндров, кубов, прямоугольных параллелепипедов) и размеров (коэффициент формы меняли от $0,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,4 \cdot 10^{-4}$ м²) [48]. Аналогичные данные получены по коэффициенту температуропроводности свеклы в виде цилиндров высотой от 35,5 до 42,5 мм [414].

Коэффициенты тепло- и температуропроводности [в Вт/(м·К) и м²/с] картофеля уменьшаются с увеличением срока его хранения до варки [66].

$$\lambda = 0,66 - 0,00116 M; \quad (II-19)$$

$$a \cdot 10^8 = 16,9 - 0,19 M, \quad (II-20)$$

где M — срок хранения картофеля, мес.

Формулы (II-19) и (II-20) справедливы при M до 10 мес.

Теплофизические характеристики овощей при разных способах варки [46, 70]

Овощи	W, %	ρ , кг/м ³	В нагреваемой воде		В кипящей воде		Во влажном насыщенном паре	
			λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Картофель	77,5— 80,0	106— 1098	0,67	17,5	0,64	16,0	0,59	15,4
Морковь	89,5	974— 1020	—	—	0,61	16,1	0,60	15,6
Свекла	86,4— 88,1	979— 1030	0,65	16,4	0,60	15,9	0,59	15,4
Помидоры	94	933	—	16,6	—	15,1	—	—

Коэффициенты тепло- и температуропроводности неочищенных овощей при их варке больше, чем очищенных (табл. II-23). При варке картофеля и моркови в кипящей воде их ТФХ практически не зависят от сорта (табл. II-23). Значения коэффициента температуропроводности сахарной свеклы [414], картофеля и репчатого лука [46] не зависят (с точностью до 3,5%) от того, подвергаются ли образцы первичному или многократному нагреву.

Таблица II-23

Теплофизические характеристики вареных овощей разных сортов [66]

Овощи	Очищенные образцы				Неочищенные образцы			
	W, %	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	W, %	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Картофель								
Лорх	80,0	3600	0,58	15,2	81,2	3600	0,61	16,3
Берлихинген	79,2	3500	0,60	15,3	79,3	3500	0,65	16,2
Приекульский	81,6	3600	0,62	15,7	80,0	3600	0,66	16,7
Передовик	80,1	3600	0,62	15,8	79,8	3500	0,64	16,3
Морковь								
Нантская	87,9	3900	0,60	15,9	—	—	—	—
Лосиноостровская	90,7	3900	0,61	16,2	90,5	3900	0,62	16,5
Свекла Египетская	87,5	3900	0,60	15,9	86,7	3800	0,62	16,6

Коэффициент температуропроводности свеклы в интервале 293—363 К не изменяется [414, 288].

Для моркови ($W=88\div 91\%$) с ростом температуры от 308 до 368 К коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) увеличивается [230]:

$$\text{сорт Нантская } a \cdot 10^8 = 3,8 + 0,033 T; \quad (\text{II-21})$$

$$\text{сорт Лосиноостровская } a \cdot 10^8 = -0,7 + 0,047 T. \quad (\text{II-22})$$

Коэффициент температуропроводности моркови зависит от того, на какой ее части взят образец (табл. II-24).

Таблица II-24

Коэффициент температуропроводности моркови $a \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) при нагреве [357]

Морковь	Температура, К			
	303	323	343	363
Сердцевина	11,7	11,9	12,3	12,8
Поверхностный слой	13,0	13,9	14,4	14,7
В целом виде	13,3	15,3	17,2	19,4

При повышении температуры клубней сладкого (американского) картофеля от 300 до 347 К их коэффициент температуропроводности увеличивается, а при дальнейшем повышении температуры уменьшается. Исследования проводились с высушенными при 303 К клубнями после 6 мес хранения при $T=288$ К (табл. II-25).

Таблица II-25

Коэффициент температуропроводности картофеля [434]

$T, \text{ К}$	300	313	323	333	343	353	363
$a \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	10,3	10,8	12,9	15,0	22,2	16,3	15,0

Установленный характер зависимости $a=f(T)$ автор работы объясняет изменением ТФХ крахмала при клейстеризации. Это мнение не противоречит выводам, что процесс клейстеризации крахмала способствует повышению коэффициентов тепло- и температуропроводности овощей соответственно в 1,5—2,8 и 1,7—3,3 раза [64].

Пастеризованные плоды и ягоды. Формулы для определения ТФХ плодов приведены в табл. II-26, а значения ТФХ — в табл. II-27.

Формулы для определения теплофизических характеристик слоя
плодов при $T=303\div338\text{ K}$

Плоды	$\varphi, \%$	Тепловой поток, Вт/м^2	Толщина слоя, мм	c_v , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$	$a \cdot 10^8$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Источники
Сливы сорта Венгерка итальян- ская	85	250— 300	3,0— 4,0	$c_v =$ $=10560 -$ $-20T$	$0,523 =$ $=\text{const}$	$a \cdot 10^8 =$ $=0,06T +$ $+6,58$	[156]
Вишни сорта Любская	—	150— 200	4,5	$c_v = 25T -$ -3100	$0,505 =$ $=\text{const}$	$a \cdot 10^8 =$ $=0,05T +$ $+0,85$	[239]

Таблица II-27

Теплофизические характеристики плодов и ягод в сахарном
сиропо [230]

Плоды и ягоды	T, K	c_v , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	Плоды и ягоды	T, K	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$
Фрукты и ягоды в сахарном сиропо (2 части ягод и 1 часть сиропа концентрацией 40%)	273—298	3567	Клубника разных размеров в 57%- ном сахарном си- ропо	276—283	0,59

Коэффициент температуропроводности плодов при пастеризации
равен: сливы $15,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, абрикосов $15,1 \cdot 10^{-8}$, вишни $15,8 \cdot 10^{-8}$
[178], яблок ($\rho=796 \text{ кг/м}^3$, $\varphi=86,7\%$) $16,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ [46].

Темп нагрева m плодов определяется их диаметром d и ско-
ростью движения воды v (опыты проводились с половинками блан-
шированных плодов). Зависимость $m=f(d)$ и $m=f(v)$ представлена
формулами (табл. II-28 и II-29).

Таблица II-28

Зависимость темпа нагрева плодов от диаметра
при $v=0 \text{ см/мин}$ и $T=368 \text{ K}$ [272]

Плоды	$d, \text{мм}$	$m, \text{мин}^{-1}$
Персики	40—70	$m=0,148-0,0005 d$
Груши	40—70	$m=0,128-0,0004 d$
Яблоки	50—60	$m=0,140-0,0006 d$

Таблица II-29

Зависимость темпа нагрева плодов от скорости движения
 плоды ($v=50\div 200$ см/мин) при $T=371$ К [272]

Плоды	d , мм	m , мин ⁻¹	Плоды	d , мм	m , мин ⁻¹
Персики	53	$m=0,113\pm 0,0002v$	Яблоки	53	$m=0,104\pm 0,0002v$
	55	$m=0,112\pm 0,0002v$		54	$m=0,108\pm 0,0002v$
	58	$m=0,104\pm 0,0002v$		55	$m=0,104\pm 0,0002v$
Груши	54	$m=0,106\pm 0,0001v$		60	$m=0,103\pm 0,0002v$
	55	$m=0,104\pm 0,0001v$			
	58	$m=0,103\pm 0,0001v$			

Обжаренные овощи. Исследованием эквивалентных ТФХ обжаренных в растительном масле ($T=408$ К) клубней картофеля установлено, что по мере уменьшения влажности (от 80 до 40%) объемная теплоемкость [в кДж/(м³·К)] и коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] их уменьшаются, а коэффициент температуропроводности (в м²/с) не изменяется [47]:

$$c_V = 500 + 42,5 W \text{ (II-23); } \lambda = 0,05 + 0,00275 W \text{ (II-24);}$$

$$a \cdot 10^8 = 7,6 = \text{const (II-25).}$$

Таблица II-30

Изменение теплофизических характеристик овощей в процессе
 обжарки [206, 207]

Овощи	τ , мин	c_V , кДж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	W , %
Морковь	0	4145	0,630	15,08	88,9
	40	4940	0,650	13,19	89,0
	45	5150	0,530	10,28	86,5
Кабачки	0	3852	0,600	15,50	94,4
	30	4522	0,640	14,11	93,0
	45	4480	0,617	13,69	92,5
Баклажаны	0	3119	0,374	11,94	91,7
	12	4350	0,630	11,39	91,5
	16	4950	0,590	11,83	82,8

Таблица II-31

Изменение степени пористости и плотности овощей в результате обжарки [206, 207]

Овощи	α_n %		ρ , кг/м ³	
	сырые	обжаренные	сырые	обжаренные
Морковь	2—10	69—76	973—1040	350—560
Кабачки	9—13	80—87	855—917	210—290
Баклажаны	36—50	80—91	527—641	120—210

Коэффициенты тепло- и температуропроводности картофеля и моркови в процессе обжаривания в растительном масле уменьшаются. Вызвано это влиянием массообмена на теплообмен (табл. II-32).

Таблица II-32

Теплофизические характеристики овощей в зависимости от температуры масла [47]

Т, К	Картофель				Морковь			
	c_p , кДж/(м ³ ·К) (× К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	относительный массообмен, %	c_p , кДж/(м ³ ·К) (× К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	относительный массообмен, %
333	3182	0,28	8,8	1,5	3796	0,41	10,8	2,0
353	3388	0,41	12,1	1,5	3813	0,45	11,8	2,5
373	3529	0,42	11,9	4,5	3865	0,46	11,9	6,0
393	3575	0,34	9,7	12,5	3981	0,43	10,8	14,2
413	3750	0,27	7,2	19,5	3871	0,36	9,3	23,0
433	3509	0,20	5,7	25,5	3816	0,29	7,6	27,5
453	3404	0,16	4,7	31,5	3667	0,22	6,0	33,0

Сушеные овощи, плоды и ягоды. Овощи, плоды и ягоды, высушенные конвективным способом. Экспериментальные значения удельной теплоемкости сушеных овощей и апельсинов различаются между собой не больше, чем для одного и того же вида, но полученные в разных работах (табл. II-33).

Таблица II-33

Удельная теплоемкость сушеных овощей ($W < 2,3\%$)

Продукт	T, К	$c_{св}$, Дж/(кг·К)	Источ- ник	Продукт	T, К	$c_{св}$, Дж/(кг·К)	Источ- ник
Карто- фель	—	1549	[195]	Морковь	—	1507	[195]
	333	1420	[47]		333	1300	[47]
	319	1302	[230]		—	1424	[357]
	286	1205	[230]		319	1440	[230]
	335	1420	[284]	Свекла	286	1172	[230]
	283	1324	[351]		—	1424	[195]
	313	1446	[351]		333	1460	[47]
Брюква Капуста	319	1469	[351]		—	1382	[251]
	—	1256	[195]	Апель- сины	—	1453	[428]
	—	1256	[195]		333	1460	[274]

Вычисленная по закону Коппа и Неймана удельная теплоемкость сухих веществ продуктов, богатых углеводами и содержащих незначительное количество белков и жира, составляет 1400 Дж/(кг·К), т. е. незначительно отличается от приведенной в табл. II-33.

Удельная теплоемкость сухих веществ томатов [в Дж/(кг·К)] с ростом температуры от 293 до 353 К увеличивается [274].

$$c = 461 + 37. \quad (\text{II-26})$$

Обработка экспериментальных данных по $c_{св} = f(T)$ для овощей [17, 230, 284, 351, 274], полученных при $T = 284 \div 353$ К, позволяет рекомендовать формулу

$$c_{св} = 885 + 1,6T, \quad (\text{II-27})$$

где $c_{св}$ выражена в Дж/(кг·К).

Значения удельной теплоемкости сухих веществ овощей, плодов и ягод [106], которые вычислены с использованием правила аддитивности (по неточным данным удельной теплоемкости свежих овощей, плодов и ягод [260]), заметно отличаются от экспериментальных [67].

Таблица II-34

Плотность сухих веществ овощей и мякоти ягод

Продукт	$\rho_{св}$, кг/м³		Источ- ник	Продукт	ρ , кг/м³ свежие	Источ- ник
	свежие	обжарен- ные				
Баклажаны	1600	1130—1190	[146]	Картофель	1526	[351]
Кабачки	1660	1550—1600	[146]	Сельдерей	1584	[300]
Морковь	1610	1450—1570	[146]	Перец зеленый	1510	[300]
Лук	1610	—	[146]	Свекла	1350	[169]
Клюквенная мякоть	1479	—	[211]	Брусничная мякоть	1448	[342]

Для монолита сухих веществ ($\epsilon_n=0\%$) продуктов ТФХ составляют: $c_{св}=1340$ Дж/(кг·К) (см. табл. II-33), $\rho_{св}=1600$ кг/м³ (табл. II-34), $\lambda_{св}=0,256$ Вт/(м·К) [230, 278, 310]. Следовательно, $\alpha_{св}=11,4 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Т а б л и ц а II-35

Теплофизические характеристики сухих веществ овощей

Овощи	T, К	$\rho_{св}$, кг/м ³	$\lambda_{св}$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	Источники
Картофель	328	1049	0,13	8,7	[70]
	333—338	210	0,041	13,8	[284]
	283	250	0,044	13,3	[351]
	313	250	0,049	13,5	[70]
Морковь	328	1015	0,12	9,1	[70]
Свекла	—	1420	0,36	18,3	[251]
	328	1008	0,13	8,8	[70]
Томаты	283	1248	0,15	8,9	[274]
	313	1295	0,19	10,0	[274]

Удельная теплоемкость сушеных овощей с повышенным влажностью и температуры увеличивается (табл. II-36).

Т а б л и ц а II-36

Удельная теплоемкость сушеных овощей ($W>3,5\%$) [230, 260]

Продукты	W, %	T, К	c, Дж/(кг·К)
Морковь	3,5	273—300	1369
	3,5	300—339	1985
	14,5	300—339	2261
Картофель	4,5	300—339	1465
	8,05	273—300	1403
	8,05	300—339	1712
Свекла	4,4	300—339	2010
Капуста	5,4	300—339	2177
Шпинат	5,9	300—339	1800
Сладкий картофель	7,6	300—339	2052
Кукуруза	13,5	—	1298
Перец	12,0	—	1256
Финики	20,0	—	1507
Инжир	24,0	—	1633
Сливы	28	273—373	2219
Бобы	12,5	—	1256
Горох	9,5	—	1172
	14	273—373	1842

установленная зависимость $c_{св}=f(T)$ для сухих веществ овощей (II-27) и правило аддитивности позволяют рекомендовать для определения удельной теплоемкости сушеных овощей [в Дж/(кг·К)] следующую формулу:

$$c = 885 + 33,0W + 1,6T \left(1 - \frac{W}{100}\right). \quad (\text{II-28})$$

Экспериментальные значения удельной теплоемкости 22 видов овощей ($W=12\div 97\%$) и 12 видов плодов и ягод ($W=30\div 92\%$) [230], апельсинов ($W=0\div 85\%$) [428], 18 видов овощей и плодов ($W=50\div 95\%$) [391], яблок ($W=25\div 70\%$) [282], картофеля ($W=2,2\%$) [351], определенные при $T=273\div 373$ К и вычисленные по формуле (II-28), различаются несущественно при $T=283$ К. Значения удельной теплоемкости овощей, плодов и ягод, которые определены по формулам (II-28 и II-1), практически не различаются.

Насыпная плотность сушеных овощей колеблется в широких пределах (табл. II-37).

Т а б л и ц а II-37

Насыпная плотность сушеных овощей [16]

Овощи	W, %	ρ_n , кг/м ³	Овощи	W, %	ρ_n , кг/м ³
Картофель	8,4	525	Перец черный	11,3	540
Лук	6,4	450	Горох лущеный	12,9	850
Морковь	10,6	450	Горох варено-сушеный	6,8	745

Т а б л и ц а II-38

Насыпная плотность свекловичного жома при $T=268$ К [169]

W, %	0	33,4	50,0	60,0	66,7	71,4	74	83,3
ρ_n , кг/м ³	1350	1220	1170	1120	1100	1090	1070	1040

Плотность брикетов свекловичного жома при $W=10\%$ ($T=293$ К) с повышением давления прессования в закрытой пресс-форме увеличивается и при $p=50, 100$ и 200 МПа соответственно составляет $850, 980$ и 1080 кг/м³ [153].

Рекомендованы формулы, учитывающие влияние температуры ($T=248\div 313$ К), влажности ($W=0\div 8\%$) и насыпной плотности ($\rho_n=125\div 275$ кг/м³) сушеного картофеля на коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] [351],

$$\lambda = \lambda_0 + 1,546 \cdot 10^{-4} (T - 273), \quad (\text{II-29})$$

где при $W=2,2\%$ и $\rho_n=250 \text{ кг/м}^3$ $\lambda_0=0,0426 \text{ Вт/(м·К)}$; при $W=2,5\%$ и $\rho_n=138 \text{ кг/м}^3$ $\lambda_0=0,0355 \text{ Вт/(м·К)}$.

При $T=284 \text{ К}$ и $W=2,3\%$

$$\lambda = 0,0256 + 0,603 \cdot 10^{-4} \rho_n + 0,559 \cdot 10^{-7} \rho_n^2 \quad (\text{II-30})$$

При $T=283 \text{ К}$ и $\rho_n=240 \text{ кг/м}^3$

$$\lambda = 0,041 + 7,146 \cdot 10^{-4} W \quad (\text{II-31})$$

Для картофеля, моркови, свеклы и томатов ($\rho=1000 \div 1050 \text{ кг/м}^3$) в интервале $W=0 \div 95\%$ предложена формула [70]

$$\lambda = 0,13 + 0,0052 W \quad (\text{II-32})$$

где λ выражена в Вт/(м·К) .

Формула для определения $\lambda=f(W)$ овощей в интервале $W=60 \div 95\%$ [419] незначительно отличается от формулы (II-32).

При увеличении влажности картофеля и яблок значения их теплофизических характеристик увеличиваются (табл. II-39).

Т а б л и ц а II-39

Теплофизические характеристики картофеля ($T=333 \text{ К}$) [284] и яблок ($T>293 \text{ К}$) в зависимости от влажности [282]

W, %	Картофель			Яблоки		
	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$a \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$a \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
10	233	0,05	14,12	—	—	—
20	262	0,08	14,44	—	—	—
30	300	0,10	14,76	321	0,08	9,3
40	350	0,15	15,08	372	0,11	10,0
50	420	0,18	15,40	445	0,15	10,7
60	525	0,25	15,72	559	0,21	11,4
70	700	0,35	16,04	703	0,28	12,1
80	1050	0,53	16,36	—	—	—

В интервале $T=273 \div 323 \text{ К}$ коэффициент температуропроводности сушеного картофеля (в $\text{м}^2/\text{с}$) равен [351]:

$$a = [a_0 + 0,0051 (T - 273)] \cdot 10^{-8}, \quad (\text{II-33})$$

где a_0 является функцией насыпной плотности:

$\rho_n, \text{ кг/м}^3$	180	225	250	275	300	325
$a_0 \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	15,9	14,9	13,3	12,8	12,5	12,3

Коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) картофеля, моркови, свеклы и томатов ($\rho=1000 \div 1050 \text{ кг/м}^3$) в интервале $W=0 \div 95\%$ рекомендовано определять по формуле [70]

$$a \cdot 10^8 = 8,9 + 0,072 W \quad (\text{II-34})$$

Таблица II-40

Теплофизические характеристики моркови и перца [126, 290]

Овощи	T, K	$W, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Морковь	293	68	800	3140	0,302	11,4
	308	78	417	3350	0,362	25,0
	338	80	445	3517	0,394	26,9
Перец красный	273	16,4	473	1805	0,090	10,6

Овощи, плоды и ягоды, высушенные сублимацией. В процессе сушки плодов сублимацией и нагревом зависимость $\rho = f(n)$ для них описывается примерно одинаковыми формулами (табл. II-41).

Таблица II-41

Формулы для определения плотности сушеных плодов

Плоды	$T, ^\circ\text{C}$	$n, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Источник
Яблоки	От 271,7 до 264,4	10,8—63,7	$\rho = 944 + 5,52n$	[127]
	От 271,6 до 265,6	12,25—63,0	$\rho = 959 + 4,97n$	[230]
	293	10,0—64	$\rho = 981 + 5,10n$	[157]
	273	8—42	$\rho = 1000 + 5,5n$	[287]
Сливы	От 271,3 до 255,0	14,1—63	$\rho = 989 + 4,82n$	[230]

Таблица II-42

Коэффициент теплопроводности фруктового пюре, картофеля и сока ($W=5\%$), высушенных сублимацией [286, 135]

Продукт	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	Продукт	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
Пюре виноградное	0,029—0,038	Картофель	0,021—0,023
Пюре вишневое	0,030—0,034	Пюре абрикосовое	0,035—0,037
Пюре яблочное	0,035—0,039	Сок	0,026—0,034

Таблица 11-43

Влияние давления и вида среды на коэффициент теплопроводности плодов [230, 328]

Плоды	Среда	Т, К	λ [в Вт/(м·К)] при давлении $p \cdot 10^{-3}$ Па						
			0,0001	0,001	0,01	0,1	1,3	13,3	101,3
Яблоки Перси- ки	Воздух	255—316	0,0156	0,0156	0,0173	0,0260	0,0381	0,0415	0,0415
		255—316	0,0156	0,0156	0,0173	0,0260	0,0398	0,0433	0,0433
Яблоки и гру- ши	Угле- кислота	299—316	—	—	0,0225	0,0277	0,0363	0,0398	0,0398
	Гелий	299—316	—	—	0,0260	0,0398	0,0648	0,1557	0,1695
	Азот	299—316	—	0,0225	0,0242	0,0311	0,0433	0,0502	0,0502

Объяснение S-образного характера кривых зависимости $\lambda = f(p)$ дано в [135].

Таблица 11-44

Теплофизические характеристики некоторых видов продуктов, высушенных сублимацией [431]

Продукт	ρ , кг/м ³	с [в Дж/(кг·К)] при Т, К			λ , Вт/(м·К) $\alpha \cdot 10^4$, м ² /с	
		273	298	323	при Т=283+323 К	
Картофель	162	1281	1423	1516	0,033	13,7
Яблоки	103	1486	1725	1901	0,042	23,0
Говядина	281	1319	1444	1549	—	—

Охлажденные овощи, плоды и ягоды. Темп охлаждения m (в мин⁻¹) картофеля, жаренного до полуготовности ($\rho_n = 350 \div 450$ кг/м³), нарезанного брусочками 40×10 мм, в воздухе ($T = 285$ К) в зависимости от числа слоев и скорости движения воздуха (0,8—7,5 м/с) составляет [269]:

для одного слоя высотой 10 мм

$$m = 0,232 + 0,033v; \quad (II-35)$$

для трех слоев высотой около 40 мм

$$m = 0,051 + 0,031v. \quad (II-36)$$

Таблица 11-45

Теплофизические характеристики овощей, охлаждаемых в воздухе ($T = 293$ К) при естественной конвекции после варки [66]

Овощи	W, %	ρ , кг/м ³	с, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^4$, м ² /с
Картофель	77,8	1110	3559	0,66	16,7
Морковь	87,8	982	3810	0,64	17,1
Свекла	87,9	1000	3810	0,64	16,8

В процессе охлаждения и заморозки продуктов их коэффициент температуропроводности ближе к этому коэффициенту воды, чем льда, хотя 80% воды в них выморозилось (табл. II-46). Объяснение такой закономерности дано в [73].

Таблица II-46

Теплофизические характеристики овощей и плодов в интервале 299—255 К [444]

Продукт	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Клубника	921	1,35	14,7
Картофель (мякоть)	1049	1,05	13,1
Горох	993	1,05	13,3
Фасоль лимская	—	—	13,3
Персики (мякоть)	1040	1,11	12,1
Ежевика	—	—	14,8
Яблоки (мякоть)	—	—	14,9

На ТФХ груш и особенно яблок существенное влияние оказывает направление теплового потока (нагрев от 293 до 333 К или охлаждение от 333 до 293 К), как для свежих, так и для бланшированных и вакуумированных плодов (табл. II-47).

Таблица II-47

Теплофизические характеристики плодов при термообработке [85]

Вид плодов и их сорт	Состояние	Направление теплового потока	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Яблоки Симиренко	Свежие	Нагрев	0,41	13,0
		Охлаждение	0,15	4,7
	Бланшированные	Нагрев	0,45	12,7
		Охлаждение	0,19	5,4
	Вакуумированные	Нагрев	0,46	13,0
		Охлаждение	0,17	4,9
Груши Гимринские	Свежие	Нагрев	0,47	12,5
		Охлаждение	0,36	9,7
	Бланшированные	Нагрев	0,48	12,4
		Охлаждение	0,35	9,1
	Вакуумированные	Нагрев	0,50	12,7
		Охлаждение	0,31	8,0

Значения ТФХ томатной пасты в процессе ее охлаждения при различных условиях приведены в [275].

ПРОДУКТЫ ИЗ ОВОЩЕЙ, ПЛОДОВ И ЯГОД

Теплофизические характеристики продуктов из овощей, плодов и ягод колеблются в широких пределах, что в основном определяется их видом (табл. II-48÷II-58).

Таблица II-48

Теплофизические характеристики соусов

Соусы	T, K	$W, \%$	$c, Дж/(кг \cdot K)$	$\rho, Вт/(м \cdot K)$	Источник
Яблочный	306	—	4020	—	[307]
	277—305	82,8	3726	—	[422]
	295	—	—	0,69	[307]
	302	78,7	—	0,55	[419]
Томатный	277—305	92,8	4020	—	[422]

Таблица II-49

Плотность продуктов из овощей и плодов при разном содержании сухих веществ [105]

Продукты	$n, \%$	$\rho, кг/м^3$	Продукты	$n, \%$	$\rho, кг/м^3$
Томат-пюре	13,80	1057	Пектин из фруктовых выжимок Фруктовая начинка	16,49	1072
	12,07	1050		84,7	1448
	10,10	1042		69,6	1349
Томат-паста	27,1	1110		75,5	1387

Таблица II-50

Теплофизические характеристики картофельного салата [306]

T, K	$\rho, кг/м^3$	$c, Дж/(кг \cdot K)$	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	$\alpha \cdot 10^8, м^2/с$
275	1008	3308	0,481	14,4
344	—	—	0,483	—

Таблица II-51

Теплофизические характеристики начинок [216]

Начинка	T, K	$\rho, кг/м^3$	$c, Дж/(кг \cdot K)$	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	$\alpha \cdot 10^8, м^2/с$
Вишневая	—	1345	2093	0,26	9,36
Клубничная	—	1345	2014	0,26	9,50
Фруктовая	288	1375	2596	0,32	8,97
	308	—	2638	0,33	8,97
	333	—	2688	0,33	8,97
	358	—	2747	0,34	8,97
	—	1417	1964	0,27	9,81

Удельная теплоемкость сиропов (табл. II-52) и коэффициент теплопроводности (табл. II-54) увеличиваются с повышением температуры, а плотность (табл. II-53) уменьшается.

Таблица II-52

Удельная теплоемкость сиропов с [в Дж/(кг·К)] при нагреве [354, 375]

Сироп	Температура T , К					
	293	303	313	323	333	343
Апельсиновый	2846	2882	2930	2970	3015	3057
Яблочная смесь	2763	2805	2846	2931	2973	3036
Черешневый	2763	2784	2823	2846	2931	2973
Яблочный	2805	2826	2846	2889	2931	2952
Лесная смесь	2763	2789	2815	2841	2863	2889

Таблица II-53

Формулы для определения плотности сиропов [354, 375]

Сироп	T , К	ρ , кг/м ³
Апельсиновый	293—343	$\rho = 1482 \pm 0,44T$
Яблочный	293—343	$\rho = 1473 \pm 0,48T$
Лесная смесь	293—373	$\rho = 1497 \pm 0,57T$

Таблица II-54

Коэффициент теплопроводности сиропов λ [в Вт/(м·К)] при нагреве [354]

Сироп	Температура T , К				
	303	313	323	333	343
Яблочный	0,40	0,43	0,46	0,48	0,49
Апельсиновый	0,40	0,46	0,51	0,54	0,57

Коэффициент температуропроводности сиропов (в м²/с) в интервале 303—343 К равен [354]:

$$\text{апельсинового } a \cdot 10^8 = -12,40 + 0,0777T; \quad (\text{II-37})$$

$$\text{яблочного } a \cdot 10^8 = -9,30 + 0,0667T. \quad (\text{II-38})$$

С повышением содержания сухих веществ удельная теплоемкость соков уменьшается, так как $c_{св}$ (см. табл. II-33) примерно в 3 раза меньше удельной теплоемкости воды.

С ростом температуры удельная теплоемкость соков увеличивается, причем влияние температуры тем существеннее, чем больше в них содержится сухих веществ.

Экспериментальная удельная теплоемкость различных соков [11, 285, 37] при $T=293\div353$ К и вычисленная по формуле (II-28) различаются незначительно, поэтому эта формула рекомендуется для определения $c=f(n, T)$ соков.

Таблица II-55

Теплофизические характеристики пюре- и пастообразных продуктов

Продукт	n, %	T, К	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	Источник
Пюре							
яблочное	10,5 10,5	273 —	1056 —	3881 —	0,545 0,040+ +0,001857	13,3 —	[290] [290]
томатное	31,6 31,6	273 —	1051 —	3760 —	0,507 0,117+ +0,001437	11,8 —	[290] [290]
банановое	—	288	—	3664	0,69	—	[307]
из яблок и абрикосов	—	293—353	1109— —4,7—3× ×(T—273) ^{0,1}	3211+ +0,2517	0,284+ +6,39× ×10 ⁻⁴ T	18,78+ +0,0237	[10]
из яблок и вишни	—	293—353	1178— —0,2827	2026+ +4,307	0,450+ +13,0× ×10 ⁻⁴ T	19,09+ +0,0197	[10]
из яблок, тыквы и моркови	—	325	1152— —0,3437	3471+ +0,5457	0,280+ +8,25× ×10 ⁻⁴ T	20,30+ +0,0267	[10]
		325	1232— —0,5907	—	—	—	[10]
Яблочное повидло	67,5 67,5	273 —	1294 —	2261 —	0,303 —0,366+ +0,002457	10,3 —	[290] [290]
Клубничная паста	—	293—323	—	1102+4,17	—	—	[375]

На плотность сока данного вида не влияют сортовые особенности исходного сырья, а также различия в районах и годах его произрастания. Так, плотность яблочных соков, изготовленных из шести сортов яблок при примерно равном содержании сухих веществ и одинаковой температуре [283] и семи сортов винограда, выращенного в разные годы и в разных районах СССР [150], различается менее чем на 0,5%.

Для соков из ягод вишни и малины (с добавлением 10% сахара), винограда и яблок плотность (в кг/м³) в интервале $T=293\div353$ К описывается единой формулой [271]

$$\rho = 991 + 5,1n - 0,37(T - 273) - 0,006n(T - 273). \quad (\text{II-39})$$

Совместная обработка экспериментальных данных по плотности (в кг/м³) томатного [17, 359, 274, 149, 99, 247, 11], яблочного [157, 155, 63, 287, 136, 362], виноградного [155, 37] и других видов соков

[271, 230, 211] при $T=277\div 403$ К и $n=4\div 74\%$ позволила рекомендовать формулу [276]

$$\rho = 1148,6 + 5,0n - 0,57T. \quad (\text{II-40})$$

Значения коэффициента теплопроводности разных видов соков (табл. II-56) различаются не больше, чем для одного и того же вида (томатного), полученного в различных работах (табл. II-57). На это обращено внимание [74, 276] и предложена универсальная формула для определения коэффициента теплопроводности соков [формула (1) во введении].

Таблица II-56

Теплофизические характеристики фруктовых соков при $T=288$ К [422]

Сок	W, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Яблочный	87,2	1051	0,554	13,7
Черничный	89,5	1041	0,554	13,7
Черешневый	86,7	1053	0,554	13,7
Апельсиновый	89,0	1043	0,554	13,7
Малиновый	88,5	1046	0,554	13,7
Клубничный	91,7	1033	0,571	13,9
Грейпфрутовый	84,7	1062	0,541	13,3

Таблица II-57

Коэффициент теплопроводности томатного сока λ [в Вт/(м·К)] при нагреве

n, %	Температура T, К		Источник	n, %	Температура T, К		Источник
	303	333			303	333	
10	0,55	0,58	[285]	30	0,46	0,50	[285]
	0,55	0,61	[149]		0,47	0,53	[149]
	0,53	0,56	[119]		0,47	0,50	[100]

Данные по λ и ρ яблочного [155, 287, 230], виноградного [155, 230, 37], томатного [285, 149, 100, 11], грушевого [230] и плодово-ягодного [56] соков в интервале $n=5\div 60\%$ и $T=273\div 363$ К позволили разработать формулы зависимости постоянной B от содержания сухих веществ n , которые приведены ниже:

$$\begin{aligned} \text{при } n=0-20\% \quad B \cdot 10^3 &= 0,694 - 0,0090n; \\ \text{при } n=20-43\% \quad B \cdot 10^3 &= 0,629 - 0,0058n; \\ \text{при } n=43-60\% \quad B \cdot 10^3 &= 0,526 - 0,0034n. \end{aligned}$$

Коэффициент температуропроводности соков от их вида практически не зависит и определяется температурой и содержанием сухих веществ (табл. II-58).

Коэффициент температуропроводности соков $a \cdot 10^6$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) при нагреве

Сок	λ , %	Температура T , К					Источник
		283	293	303	323	343	
Томатный	10	—	13,0	13,4	14,1	14,7	[287]
		14,5	14,7	14,8	15,1	15,5	[11]
Яблочный		—	—	13,9	14,5	15,1	[287]
Виноградное сусло		13,0	13,9	14,4	15,2	15,7	[221]
Томатный	40	—	11,7	12,0	12,5	13,0	[287]
		11,6	11,8	11,9	12,2	12,6	[11]
Виноградный		11,2	11,7	—	—	—	[37]
Яблочный		—	—	—	12,0	13,3	[274]

Для определения зависимости $a=f(\lambda, T)$ соков в интервале $T=273 \div 373$ К и $\lambda=5 \div 60\%$ рекомендуется универсальная формула (7) во введении [402]. Значения коэффициента температуропроводности соков, вычисленные по этой формуле, и экспериментальные [287, 11, 274, 221, 37] различаются менее чем на 10%.

2. МЯСО И МЯСНЫЕ ПРОДУКТЫ

МЯСО УБОЙНОГО СКОТА, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ (ДОМАШНЕЙ) ПТИЦЫ И ДИЧИ

Мясо убойного скота. При $W > 26\%$ удельная теплоемкость мяса [в Дж/(кг·К)] равна [399]:

$$c = 1675 + 25,1W. \quad (\text{II-41})$$

Экспериментальная удельная теплоемкость говядины, баранины, телятины, свинины, а также мяса птицы и оленины при $W=26 \div 86\%$ и $T=273 \div 303$ К [230, 260, 422, 245, 299, 290] и вычисленная по формуле (II-41) различаются менее чем на 10%.

Экспериментальные данные по удельной теплоемкости мяса [в Дж/(кг·К)] при разной жирности J : говядины ($J=3,8$ и $10,5\%$ [116]), свинины ($J=21,5$ и $37,5\%$ [129]), телятины и мяса ягненка ($J=2,9 \div 39,4\%$ [320]), которые получены при $T=273 \div 303$ К, позволяют рекомендовать формулу, справедливую при $J=3 \div 30\%$,

$$c = 3658 - 25,1J. \quad (\text{II-42})$$

Совместный анализ формул (II-41) и (II-42) свидетельствует, что первая из них справедлива при $J \leq 30\%$.

Экспериментальные значения удельной теплоемкости мяса (при $J < 30\%$) и вычисленные по формулам (II-41) и (II-42) различаются незначительно (табл. II-59). Поэтому эти формулы рекомендуются для определения $c=f(W)$ и $c=f(J)$ мяса при $T=273\div 303\text{ K}$, $W > 26\%$ и $J < 30\%$.

Таблица II-59

Экспериментальная и расчетная удельная теплоемкость мяса

Мясо	W, %	J, %	c , Дж/(кг·К)	Источник	c [в Дж/(кг·К)] по формуле	
					II-41	II-42
Телятина	77,5	4,4	3600	[320]	3620	3548
Филей ягненка						
постное	64,9	11,7	3390	[320]	3304	3364
жирное	52,5	28,4	2931	[320]	2993	2945
Ножки ягненка	57,8	20,4	3182	[320]	3126	3146
Поясная часть ягненка	50,5	29,2	3020	[320]	2943	2925
Пышка	49,8	30,2	2894	[320]	2948	2900
Говядина I категории	70,5	10,5	3603	[116]	3445	3394
Говядина						
I категории	72,7	4,5	3458	[290]	3500	3545
II категории	76,4	3,2	3551	[290]	3593	3578
III категории	76,6	0,9	3530	[290]	3596	—
Свинина						
мясная	60,9	21,5	3653	[129]	3204	3118
жирная	47,5	37,3	3722	[129]	2867	2722

Объяснение характера зависимости $c=f(T)$ для мяса приведено в литературе [62, 200].

Таблица II-60

Удельная теплоемкость мяса при $T=273\div 275\text{ K}$ [413]

Мясо	W, %	J, %	c , Дж/(кг·К)
Телятина	77,5	4,4	3685—3601
Филей			
ягненка	64,9	11,7	3391
постное	52,5	28,4	2931
жирное	44,4	39,4	3098—3350

Таблица II-61

Удельная теплоемкость мяса с [в Дж/(кг·К)] в интервалах температур

Мясо	W, %	Ж, %	Температурные интервалы, К				Источ-ник
			273—285	285—310	310—320	320—373	
Говядина выс-шего сорта	—	—	—	3705—	—	3400—	[129]
I сорта	—	—	—	3345	—	3919	
				4187—	—	3316—	[62]
				3287		4095	
II сорта	—	—	—	4313—	—	2663—	[62]
				2663		3090	
I категории	70,5	10,5	3700—	4100—	3590—	—	[116]
			4100	3590	3570		
II категории	74,1	3,8	3610—	3740—	3580—	—	[116]
			3740	3580	3570		
обезжиренная	—	—	—	3664—	—	3056—	[200]
				3056		3224	
Поджелудоч-ная железа крупного рога-того скота	76,0	4,2	3700—	3800—	3640—	—	[116]
			3820	3640	3630		
Свинина мясная	60,9	21,5	3850—	3400—	3390—	—	[129]
			3400	3600	3350		
жирная	47,5	37,3	4060—	3290—	3270—	—	[129]
			3290	3630	3170		
полужир-ная	—	—	—	4459—	—	2742—	[62]
				2701		2805	
обезжирен-ная	—	—	—	3685—	—	2994—	[200]
				2994		3224	
Баранина обез-жиренная	—	—	—	3685—	—	3140—	[200]
				3140		3936	

С ростом температуры плотность мяса (в кг/м³) уменьшается. Для постной говядины в интервале $T = 278 \div 303$ К справедлива формула [343]

$$\rho = 1197 - 0,43T. \quad (\text{II-43})$$

Таблица II-62

Формулы для определения плотности мяса [337]

Мясо	Ж, %	ρ , кг/м³
Свинина	1,5—35,8	$\rho = 1100 - 2,58Ж$
Баранина	14,3—47,5	$\rho = 1102 - 1,92Ж$
	24,9—61,7	$\rho = 1100 - 2,00Ж$

Совместная обработка данных по плотности (в кг/м³) лопаток коровы, свиньи и быка, а также говядины при $J=5\div 42\%$ и $T=273\text{ K}$ [442] позволяет рекомендовать формулу

$$\rho = 1070 - 1,19J. \quad (\text{II-44})$$

Плотность (в кг/м³) свиных ножек ($T=282\div 289\text{ K}$) в зависимости от содержания в них костей (E) и мышц ($Ш$) равна [337]:

$$\rho = 975 + 21E; \quad (\text{II-45})$$

$$\rho = 1050 - 1,46Ш - 1,95E. \quad (\text{II-46})$$

С ростом температуры туши говядины увеличивается зависимость ее плотности (в кг/м³) от содержания жира [343], а именно

$$\text{при } T = 278\text{ K} \quad \rho = 1130 - 1,30J; \quad (\text{II-47})$$

$$\text{при } T = 298\text{ K} \quad \rho = 1122 - 1,45J. \quad (\text{II-48})$$

Формулы (II-47) и (II-48) справедливы при $10 < J < 50\%$.

Т а б л и ц а II-63

Плотность мяса при $T=273\div 304\text{ K}$ [345, 290]

Мясо	W, %	T, K	ρ , кг/м ³
Говядина			
выше средней упитанности	74,5	273—303	1077
ниже средней упитанности	78,5	273—303	1066
Говядина I сорта	78,7	273	1130
Свинина	76,8	273—304	1070
Солонина	74,0	273	1110

Т а б л и ц а II-64

Коэффициент теплопроводности говядины при $T=273\div 278\text{ K}$

Направление теплового потока	W, %	J, %	λ , Вт/(м·K)	Источник
Перпендикулярно волокнам мяса	78,5	—	0,479	[245]
	74	3,4	0,481	422
	76	3,0	0,436	335
Параллельно волокнам мяса	75	0,9	0,491	422
	76,5	2,3	0,40	335
	85	—	0,50	286
	—	—	0,46	389
	—	—	0,42	339

Укладочная масса отдельных отрубов составляет: лопаток 368 кг/м², задней части 406, корейки 286 кг/м² [198].

Коэффициент теплопроводности одного и того же вида мяса в разных работах различается незначительно, например для говядины (табл. II-64) и свинины (табл. II-65).

Т а б л и ц а II-65

Коэффициент теплопроводности свинины при $T = 273 + 278 \text{ K}$

Направление теплового потока	W, %	Ж, %	λ , Вт/(м·К)	Источник
Перпендикулярно волокнам мяса	76,8	—	0,477	[245]
	72	6,1	0,460	[422]
	72	—	0,456	[286]
	76	—	0,477	[286]
	75,6	6,7	0,488	[335]
Параллельно волокнам мяса	75,1	7,8	0,443	[335]
	72,0	6,1	0,502	[422]

Коэффициент теплопроводности конины при $T = 303 \text{ K}$ составляет 0,439 Вт/(м·К) [286].

Коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] мяса при $W = 52 \div 70\%$ может быть определен по формуле [425]

$$\lambda = 0,056 + 0,0057W. \quad (\text{II-49})$$

Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности говядины [389], конины при $W > 50\%$ [286] и вычисленные по формуле (II-49) практически не различаются.

Содержание жира в мясе не оказывает заметного влияния на его коэффициент теплопроводности (табл. II-66).

Т а б л и ц а II-66

Коэффициент теплопроводности мяса при $T = 332 \div 355 \text{ K}$ [335]

Мясо	W, %	Ж, %	λ , Вт/(м·К)
Говядина	78,9	0,8	0,51
Свинина	75,9	6,7	0,54
Телятина	75,0	2,1	0,49
Баранина	71,8	8,7	0,48

С повышением температуры коэффициент теплопроводности мяса увеличивается [335, 290, 257, 422, 368]. Формулы, полученные совместной обработкой экспериментальных данных по мясу (тепловой поток направлен перпендикулярно к волокнам [335, 257, 245]), представлены в табл. II-67.

Таблица II-67

формула для определения коэффициенты теплопроводности мяса

Мясо	W, %	T, K	λ , Вт/(м·K)
Говядина	75—79	283—373	$\lambda = 0,422 + 0,00019T$
Баранина	72—74	283—373	$\lambda = 0,430 + 0,00016T$
Свинина	75,9	273—333	$\lambda = 0,250 + 0,00087T$

При наличии потери массы в процессе нагрева говядины из лопаточной части ее коэффициент теплопроводности вначале уменьшается, а затем увеличивается (табл. II-68), а если потери массы отсутствуют — то только увеличивается (табл. II-69).

Таблица II-68

Коэффициент теплопроводности говядины при потере массы [334]

Показатели	Температура T, K					
	287	295	310	319	340	353
λ , Вт/(м·K)	0,466	0,442	0,427	0,411	0,533	0,557
W, %	61,4	—	—	—	—	47,2

Таблица II-69

Коэффициент теплопроводности говядины без потери массы [334]

T, K	312	322	324	330	333	337	342
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·K)	427	449	450	466	470	487	505

Сведения о влиянии на коэффициент теплопроводности мяса направления теплового потока противоречивы (табл. II-70). Так, по данным одних исследователей [257, 422] коэффициент теплопроводности больше, если поток направлен параллельно волокнам, а по данным других [230, 335] — если перпендикулярно.

Коэффициент теплопроводности мяса λ [в Вт/(м·К)]

Мясо	В, %	Ж, %	Т, К	Направление теплового потока		Источник
				параллельно волокну мяса	перпендикулярно волокну мяса	
Говядина	75,0	—	293	—	0,48	257
	75,0	—	293	0,52	—	257
	74,0	3,4	276	—	0,48	422
	75,0	0,9	275	0,50	—	422
	78,9	0,8	280	—	0,48	335
Свинина	78,9	1,6	281	0,43	—	335
	72,0	6,1	277	—	0,46	422
	72,0	6,1	276	0,50	—	422
	75,9	6,7	281	—	0,50	335
	75,1	7,8	283	0,44	—	335
Баранина	74,0	—	293	—	0,48	257
	74,0	—	293	0,51	—	257
	71,8	8,7	283	—	0,45	335
	71,0	9,6	283	0,39	—	335

Данные по зависимости продолжительности охлаждения мяса от основных определяющих факторов приведены в литературе [50, 58, 242].

Таблица 11-71

Коэффициент температуропроводности мяса $a \cdot 10^8$ (в м²/с) при нагреве [245]

Мясо	W, %	ρ , кг/м ³	Температура T, K	
			273	303
Говядина				
выше средней	74,5	1077	11,7	12,5
упитанности				
ниже средней	78,5	1066	11,7	12,5
упитанности				
Свинина	76,8	1070	11,7	12,5

Изучение процесса термообработки говядины в автоклаве показали (табл. 11-73), что с ростом температуры до 400 К ее коэффициент теплопроводности увеличивается, а при дальнейшем росте температуры — уменьшается.

Таблица 11-72
Коэффициент температуропроводности мяса при $T=293\div 343$ К [62]

Мясо	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^4$, м ² /с
Говядина		
высшего сорта	1062	12,2
I сорта	1087	12,5
II сорта	1078	12,3
Свинина полужирная	1030	10,6

Таблица 11-73
Коэффициент температуропроводности говядины [338]

T , К	380	390	400	410	420	430
$a \cdot 10^5$, м ² /с	37,0	42,7	47,0	46,5	46,0	43,3

Таблица 11-74
Теплофизические характеристики мяса

Мясо	W , %	J , %	T , К	ρ , кг/м ³	$C_{Дж}/(кг \cdot K)$	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^5$, м ² /с	Источник
Говядина								
высший сорт	—	—	—	1962	3517	0,455	12,3	[62]
I сорт	—	—	—	1087	3601	0,49	12,5	[62]
II сорт	—	—	—	1078	3056	0,35	12,3	[62]
III сорт	76,4	3,2	273	—	3559	0,36	—	[290]
выше средней упитанности	76,6	0,9	273	—	3550	0,40	—	[290]
ниже средней упитанности	74,5	—	303	1077	3769	0,49	12,5	[245]
постная	78,5	—	303	1066	3770	0,49	12,5	[245]
филе постное	—	—	288	1152	3015	0,50	14,0	[389]
бок постный	75,0	0,9	280	1158	3517	0,50	12,6	[422]
бедренная часть	74,5	3,4	280	1158	3517	0,47	11,3	[422]
Свинина	76,0	3,0	280	1158	3517	0,45	11,0	[422]
полужирная	—	—	318	1030	3056	0,33	10,6	[62]
—	—	—	—	950	2177	0,41	19,8	[121]
ножки постные	76,8	—	303	1070	3770	0,49	12,5	[121]
—	72	6,1	280	1158	3475	0,50	13,0	[422]
Солонина	74	—	273	1110	3446	0,12	3,1	[290]

Мясо птицы, дичи. С повышением влажности мяса птицы и дичи удельная теплоемкость увеличивается и при $W > 26\%$ может быть определена по формуле (II-41). Экспериментальные значения удельной теплоемкости мяса кур, гусей, голубей и дичи ($W = 52 \div 76\%$) [260, 230, 86, 422] и вычисленные по формуле (II-41) различаются незначительно.

Таблица II-75

Плотность мяса птицы [300]

Мясо	ρ (в кг/м³) в среде		
	гелия	азота	воздуха
Индейка приготовленная (белое мясо)	1268	1270	1265
Цыпленок готовый мелко нарезанный (темное и светлое мясо)	1222	1225	1247

Из-за низкой теплопроводности кожи коэффициент теплопроводности одних мускул заметно больше, чем мускул с кожей (табл. II-76).

Таблица II-76

Коэффициент теплопроводности мяса кур [436]

Объект исследования	Толщина, мм		W, %	ρ , кг/м³	λ , Вт/(м·К)	
	цыпленок	курица			цыпленок	курица
Грудные мышцы ($J = 4,4\%$)	5,18	5,41	69,7	1070	0,38	0,44
Кожа	1,70	1,24	38	1030	0,03	0,02
Мускулы с кожей	—	—	—	1030—1070	0,37	0,39

Эти опыты проводились с 8-недельными цыплятами и 18-месячными курами. Температура объектов исследования менялась от 277,4 до 299,6 К при направлении теплового потока перпендикулярно волокнам мышц.

Установлено [420] влияние температуры ($T = 273 \div 293$ К) на коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] мяса кур.

Для темного мяса

$$\lambda = 0,245 + 0,000865T; \quad (\text{II-50})$$

для светлого мяса

$$\lambda = 0,311 + 0,000605T. \quad (\text{II-51})$$

Коэффициент теплопроводности мяса птицы, по данным разных авторов, различается незначительно (табл. II-77).

Можно согласиться с мнением [422] о том, что направление потока тепла по отношению к волокнам мяса незначительно влияет на их коэффициент теплопроводности.

Таблица II-77

Коэффициент теплопроводности мяса птицы

Мясо	W, %	T, K	Направление теплового потока относительно волокон мяса	λ , Вт/(м·К)	Источник
Куриное	—	277,4—299,6	Перпендикулярно	0,44	[436]
	—	277—300	Параллельно	0,44	[286]
Индеек		274	„	0,52	[286]
мускулы	74	277	Перпендикулярно	0,50	[422]
груды		275	Параллельно	0,52	[422]
мускулы	74	275	Перпендикулярно	0,50	[422]
ноги					

Таблица II-78

Теплофизические характеристики мяса птицы

Мясо	T, K	W, %	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	α 10 ⁶ , м ² /с	Источник
Куриное	—	—	1030	3307	0,41	12,0	[230]
Цыплят	273—293	69—75	1070	3559	0,415	10,9	[422]
Индеек	273—293	74	1070	3517	0,519	13,8	[422]

Сушеное мясо. Мясо, высушенное конвективным способом. Удельная теплоемкость сухих веществ мяса [в Дж/(кг·К)] с ростом температуры увеличивается [230, 116, 319, 400] и в интервале 273—320 К может быть определена по формулам:

говядина ($J = 4,2 \div 10,5\%$) [116]

$$c_{св} = 997 + 1,74T; \quad (II-52)$$

свинина ($J = 21,5 \div 37,3\%$) [129]

$$c_{св} = 814 + 1,22T; \quad (II-53)$$

обезжиренное мясо [230]

$$c_{св} = 364 + 6,7T. \quad (II-54)$$

Таблица 11-79

Удельная теплоемкость сухих веществ мяса при $T = 273 \div 293$ К

Мясо	$c_{св},$ Дж/(кг·К)	Источник	Мясо	$c_{св},$ Дж/(кг·К)	Источник
Говядина	1472	[116]	Свинина Обезжиренная спинина	1147	[129]
	1758	[399]		1465	[230]
	1675	[230]		1532	[230]
				1361	[319]

Данные по коэффициенту теплопроводности, насыпной плотности и степени пористости порошка говядины [351] и формула (II-52) позволяют рассчитать примерные значения ТФХ ее сухих веществ (табл. II-80).

Таблица 11-80

Теплофизические характеристики сухих веществ говядины ($W = 1,9 \div 2,8\%$) при $T = 283$ К

$\epsilon_n, \%$	ρ_n и $\rho_s,$ кг/м ³	$c, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$c_{св},$ кДж/(м ³ ·К)	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
67	442	1472	651	0,068	10,4
0	1340	1472	1972	0,165	8,4

Таблица 11-81

Формулы для определения удельной теплоемкости обезжиренной говядины

$W, \%$	$T, \text{К}$	$c, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	Источник
2,5—9,5	243—293	$c = 1175 + 39,0W$	[400]
2,5—9,5	263—293	$c = 1260 + 43,0W$	[400]
18,4—80	291—321	$c = 1576 + 25,8W$	[422]

Для сухого порошка говядины с $W = 1,6 \div 7,0\%$ при $\rho_n = 385$ кг/м³ и $T = 283$ К коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] [351]

$$\lambda = 0,0568 + 0,0012W. \quad (\text{II-55})$$

При повышении температуры порошка говядины от 248 до 313 К его коэффициент теплопроводности увеличивается [351]:

$$\lambda = \alpha (T - 273) + \lambda_0, \quad (\text{II-56})$$

где α — коэффициент, который зависит от влажности. Он равен $9,36 \cdot 10^{-6}$ при $W=1,9\%$ и $12,75 \cdot 10^{-6}$ при $W=2,7\%$.

ρ_0 — определяется насыпной плотностью и влажностью. Значения λ_0 приведены ниже.

ρ_n (в кг/м ³) при	269	313	319	392	442	ρ_n (в кг/м ³) при	202	543	585
$W=1,9\%$						$W=2,7\%$			
$\lambda_0 \cdot 10^4$, Вт/(м·К)	492	507	557	582	672	$\lambda_0 \cdot 10^4$, Вт/(м·К)	449	838	954

В интервале $\epsilon_n=0,552-0,918$ при $T=284$ К и $W=2,2\%$ коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] порошка говядины [351]

$$\lambda = 0,0234 + 0,086 \cdot 10^{-4} \epsilon_n + 0,286 \cdot 10^{-7} \epsilon_n. \quad (\text{II-57})$$

Экспериментальные данные по удельной теплоемкости говядины при $W=0-6\%$ и по $\lambda_0=f(\rho_n)$, которые приведены выше, позволяют выразить зависимость $\alpha=f(\rho_n)$ для порошка говядины (табл. II-82).

Таблица II-82

Коэффициент температуропроводности порошка говядины

ρ_n , кг/м ³	269	313	317	319	369	392	419	422
$a \cdot 10^8$, м ² /с	13,7	12,2	12,2	11,9	11,6	11,1	11,0	11,4

Коэффициент температуропроводности порошка говядины ($\rho_n=385$ кг/м³) при $T=283$ К и $W=2,0; 4,0; 6,0\%$ соответственно равен $11,4 \cdot 10^{-8}$; $11,8 \cdot 10^{-8}$; $12,0 \cdot 10^{-8}$ м²/с. Полученные данные по $\alpha=f(\rho_n)$ и $\alpha=f(W)$ свидетельствуют, что при изменении насыпной плотности порошка говядины определяющее влияние на коэффициент температуропроводности оказывает объемная теплоемкость, а при изменении влажности — коэффициент теплопроводности.

Мясо, высушенное сублимацией. Теплота сублимации мяса больше, чем чистой воды (табл. II-83).

Таблица II-83

Теплота сублимации продуктов g_s [414]

Продукт	r_{cs} , кДж/(кг·моль)	Продукт	r_{cs} , кДж/(кг·моль)
Цыплята		Ягненок (ножка)	56,148
темное мясо	55,729	Говядина	62,303
светлое мясо	57,245	Сок говядины	55,394
Свинина	58,576	Чистая вода	51,084
Говядина (ножка)	56,380		

Коэффициент теплопроводности измельченного сухого мяса в вакууме тем больше, чем крупнее его частицы (табл. II-84). Однако при размерах частиц мяса меньше 0,25 мм вследствие повышения насыпной плотности коэффициент теплопроводности начинает увеличиваться с уменьшением размеров частиц [113].

Таблица II-84
Коэффициент теплопроводности
сухого мяса
 λ [в Вт/(м·К)] [254]

Размер частиц, мм	Давление $p \cdot 10^{-3}$, Па		
	0,01	0,1	101
0,75	0,0157	0,0211	0,0244
1,50	0,0169	0,0216	0,0244
2,50	0,0183	0,0220	0,0244

Коэффициент теплопроводности порошка говядины зависит от вида газа, заполняющего его поры (табл. II-85).

Коэффициент теплопроводности сырой и вареной сублимированной говядины при $p = 20$ Па соответственно равен 0,057 и 0,065 Вт/(м·К) [135].

Таблица II-85

Коэффициент теплопроводности порошка говядины
 λ [в Вт/(м·К)] в разных средах [328]

Среда	Т, К	Давление $p \cdot 10^{-3}$, Па					
		0,001	0,01	0,13	1,3	13	101
Воздух	255—316	0,038	0,042	0,048	0,060	0,064	0,064
Углекислый газ	297—316	—	0,040	0,045	0,052	0,055	0,055
Гелий	297—316	0,038	0,042	0,062	0,114	0,163	0,170
Азот	297—316	0,038	0,040	0,048	0,060	0,066	0,066

Таблица II-86

Коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] говядины λ

Давление $p \cdot 10^{-3}$, Па						Источники
0,03	0,04	0,10	0,13	0,27	0,40	
0,064	0,075	0,080	0,087	0,088	0,090	[365]
—	0,062	0,066	0,072	0,073	0,074	[286]
0,057	—	—	—	0,053	0,058	[417]
—	0,043	—	0,048	0,052	—	[365]

Из данных табл. II-86 видно, что значения коэффициента теплопроводности говядины при одинаковом давлении различаются. Определяется это тем, что при разной скорости сушки структура говядины получается неодинаковой [364].

Таблица II-87

Коэффициент теплопроводности сублимированного мяса
 λ [в Вт/(м·К)]

Мясо	Давление $p \cdot 10^{-3}$, Па							Источник
	0,0001	0,001	0,013	0,133	1,33	13,3	133	
Индейка (грудка)	—	0,031	0,040	0,069	0,087	0,090	0,090	[345]
Говядина	—	0,040	0,045	0,048	0,062	0,065	0,065	[230]
	0,036	0,036	0,037	0,072	0,061	0,063	0,064	[286]

Удельная теплоемкость сублимированной говядины приведена в табл. II-44. Ее коэффициенты тепло- и температуропроводности при $T=283$ К и $\rho=281$ кг/м³ составляют: $\lambda=0,056$ и $a \cdot 10^8=13,9$ при направлении потока тепла перпендикулярно волокнам и $\lambda=0,082$ Вт/(м·К) и $a \cdot 10^8=21,0$ м²/с при направлении потока тепла параллельно волокнам [431].

Коэффициент теплопроводности мяса индейки в среде водяного пара при $p=120$ Па равен 0,047 Вт/(м·К) при направлении потока тепла перпендикулярно волокнам мяса и 0,077 Вт/(м·К) при направлении потока тепла параллельно волокнам мяса [406].

Коэффициент теплопроводности мяса индейки в среде водяного пара, азота и гелия ($p=400$ Па) соответственно равен 0,066; 0,083; 0,080 Вт/(м·К) (при направлении потока тепла параллельно волокнам мяса) [406].

Шквары. Для шквары, как и для многих пищевых материалов — плохих проводников тепла, характерно уменьшение коэффициента температуропроводности с повышением влажности (табл. II-88).

Таблица II-88

Теплофизические характеристики шквары [226]

T , К	W , %	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
298	9	1100	583	0,133	20,7
323	9	1100	1000	0,140	12,7
348	9	1100	1333	0,147	10,0
—	15	910	1000	0,120	13,1
—	20	910	1300	0,135	11,6
—	30	910	1600	0,153	10,3
—	40	910	1800	0,160	9,8

Коэффициент температуропроводности плотно уложенной шквары ($W=10\%$ и $J=10\%$) равен $5,5 \cdot 10^{-8}$ (до плавления жира) и $10,2 \cdot 10^{-8}$ м²/с (после плавления жира) [199].

Кости. Удельная теплоемкость сухих веществ кости составляет 1256 Дж/(кг·К) [230].

В зависимости от содержания влаги в костях $c = 1650 \div 2880$ Дж/(кг·К) [375, 463].

При $W=9,7\%$, $J=3,1\%$ и $\rho=1038$ кг/м³ ТФХ костей при $T=-273$ К равны: $c=1675$ Дж/(кг·К), $\lambda=0,30$ Вт/(м·К) и $a \cdot 10^8 = 17,7$ м²/с [290].

С повышением температуры костей их λ [в Вт/(м·К)] возрастает [290].

$$\lambda = -0,30 + 0,0022 T. \quad (\text{II-58})$$

Т а б л и ц а II-89

Плотность и насыпная плотность костей после обвалки

Кости	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	Кости	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³
Кости скелета	1260	412	Кости задних конечностей	1268	558
Шейные и спинные позвонки	1200	486	Кости передних конечностей	1336	123
Тазовая кость	1275	333	Кости позвоночника с отростками ребер	1217	336

Насыпная плотность костей после дробления заметно увеличивается. Если до дробления для рядовой и трубчатой костей ρ_n соответственно составляла 163—175 и 800—825 кг/м³, то после дробления она равна 600—700 и 900—950 кг/м³ [198].

МЯСНЫЕ ПРОДУКТЫ

Мясо колбасного производства. Изменения, происходящие в посоленных говядине [142] и свинине [32] в процессе созревания, не влияют на их ТФХ. Содержание соли (от 2 до 5%) не влияет на значения ТФХ посоленной говядины [142]. В интервале 277—293 К ТФХ свинины практически постоянны [32].

ТФХ посоленных говядины и свинины определяются их сортом и содержанием влаги (табл. II-90).

С увеличением содержания в свинине жира (от 10 до 60%) ее ТФХ уменьшаются [32], а именно:

$$c = 2000 - 5,4 J \quad (\text{II-59}); \quad \lambda = 0,45 - 0,005 J \quad (\text{II-60});$$

$$a \cdot 10^8 = 19,2 - 0,021 J, \quad (\text{II-61})$$

где c выражена в Дж/(кг·К), λ — в Вт/(м·К), a — в м²/с.

Фарш мясной и колбасных изделий. Установлено, что содержание жира в фарше оказывает на теплоемкость значительно меньшее влияние, чем содержание влаги.

Таблица II-90

Формулы для определения теплофизических характеристик
досоленных говядины и свинины ($T=291\text{ K}$) [32, 205]

Мясо	В, %	Ж, %	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	$a \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
Говядина					
высший сорт	60—80	—	$2630+12W$	$0,130+0,0058W$	$10,4+0,06W$
I сорт	60—80	—	$1715+14W$	$0,150+0,0050W$	$12,2+0,08W$
II сорт	60—80	—	$1415+14W$	$0,120+0,0044W$	$16,4+0,06W$
Свинина					
нежирная	66—72	10	$1250+10W$	$0,04+0,005W$	$13,5+0,08W$
полужирная	53—60	37,8	$1530+5W$	$0,02+0,004W$	$3,0+0,17W$
жирная	20—55	63,5	$1400+9W$	$0,02+0,004W$	$6,0+0,08W$

Таблица II-91

Плотность измельченного на волчке мяса [198]

Мясо	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$		
	несоленого	с добавлением 3% соли и 10% воды	соленого без добавления воды
Говядина			
высшего сорта	1048	1059	1064
I сорта	1041	1049	1054
II сорта	1033	1045	1049
Свинина			
нежирная	1027	1034	1037
полужирная	986	—	1001

Таблица II-92

Формулы для определения теплофизических характеристик фарша
колбас, выпускаемых в Болгарии, при $T=293\div 298\text{ K}$ [270]

Фарш колбасы	В, %	Ж, %	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	$a, \text{ м}^2/\text{с}$
«Витоша»	56—54	25	$c=70W-300$	$\lambda=0,01W-0,25$	$a \cdot 10^8=0,18W-2,3$
«Русе»	59—68	21	$c=41,7W+1265$	$\lambda=0,01W-0,26$	$a \cdot 10^8=0,158W+0,2$

С ростом температуры фаршей из говядины и свинины (см. табл. II-96), а также ливерной колбасы (табл. II-93), сосисок без оболочки (см. табл. II-97) и различных колбасных изделий (см. табл. II-102) их удельная теплоемкость изменяется по сложному закону, что вызвано тепловыми эффектами фазовых и химических превращений в фаршах [202, 163, 204].

Таблица II-93

Удельная теплоемкость фарша ливерной колбасы с [в Дж/(кг·К)] [163, 202]

Фарш из мяса	Ж, %	Температура T, К						
		293— 308	283— 303	308— 328	303— 333	328— 338	333— 343	343— 368
Высшего сорта	—	3454— 3957	—	3957— 3057	—	3057— 3140	—	—
I сорта	32,96	—	3643— 4271	—	4271— 3245	—	3245— 3433	3433— 2826
III сорта	10,20	—	3140— 3642	—	3642— 3140	—	3140— 3475	3475— 2617

Удельная теплоемкость колбас и молочных сосисок в процессе охлаждения уменьшается (см. табл. II-99), а сосисок без оболочки (см. табл. II-100) практически постоянна. При одной и той же температуре удельная теплоемкость колбасного фарша больше, чем готового изделия (см. табл. II-97 и II-100, II-101 и II-99).

Плотность фарша (в кг/м³) из говядины ($T=273$ К), если в него добавлена вода (до 35%), можно определить по формуле [230]

$$\rho = 1091 - 1,1W. \quad (\text{II-62})$$

Таблица II-94

Формулы для определения плотности фарша (с 2% NaCl) при $T = 293 \div 353$ К [204]

Фарш	Добавленная вода, %	ρ , кг/м³
Из говядины I сорта	35	$\rho = 1340 \pm 0,30T$
	17	$\rho = 1147 \pm 0,28T$
Из свинины нежирной	0	$\rho = 1277 \pm 0,68T$
	0	$\rho = 1198 \pm 0,43T$

Плотность (в кг/м³) фарша для сосисок без оболочки ($W = -65,6\%$ и $Ж = 20,6\%$) с ростом температуры от 293 до 353 К уменьшается [204]:

$$\rho = 1223 - 0,68T. \quad (\text{II-63})$$

В процессе охлаждения сосисок без оболочки ($W=62,4$ и $Ж=22,4$) от 343 до 273 их плотность (в кг/м^3) увеличивается [49]:

$$\rho = 722 + 3,09 T - 0,0066 T^2 \quad (\text{II-64})$$

При одной и той же температуре плотность сосисок больше, чем фарша, из которого они приготовлены (формулы II-64 и II-63), так как процесс денатурации белков сопровождается их расширением.

Плотность некоторых видов колбас, выпускаемых за рубежом при комнатной температуре равна: болонской и венской 950 кг/м^3 , духой 1030, свиной 910 кг/м^3 [325].

Т а б л и ц а II-95

Плотность фарша ρ (в кг/м^3) [198]

Фарш	Состояние фарша	Давление $p \cdot 10^{-5}$, Па					
		0,01	0,1	4,0	8,0	12,0	16,0
Из говядины высшего сорта	Под давлением	1040	1062	1097	1103	1110	1112
	После снятия давления	1025	1045	1083	1090	1092	1095
Для докторской колбасы	Под давлением	1032	1054	1090	1095	1100	1103
	После снятия давления	1019	1041	1073	1083	1090	1093

Плотность фарша докторской колбасы (в кг/м^3) в зависимости от давления ($p=0,1 \cdot 10^5$ — $16 \cdot 10^5$ Па), содержания влаги ($W=65$ — 73%) и жира ($Ж=15$ — 22%) описывается формулой [60]

$$\rho = 1037 - 2,9 Ж - 0,105 W + 22 \lg p. \quad (\text{II-65})$$

Экспериментальные данные свидетельствуют, что чем больше в фарше содержится влаги и меньше жира, тем выше его коэффициент теплопроводности. Так, при $\rho=970 \div 990 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности говяжьего фарша ($W=54\%$ и $Ж=20\%$) равен 0,35—0,37, а фарша лопаточной части ($W=64\%$ и $Ж=14\%$) — 0,41—0,43 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [425].

Коэффициент теплопроводности говяжьего фарша [в $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$] в зависимости от содержания влаги можно определить по формулам:

$$\text{при } 52 < W < 67\% [425] \quad \lambda = 0,056 + 0,0057 W; \quad (\text{II-66})$$

$$\text{при } 45 < W < 80\% \text{ и } T = 302 \text{ К} [415]$$

$$\lambda = 0,125 + 0,00325 W; \quad (\text{II-67})$$

$$\text{при } 45 < W < 80\% \text{ и } T = 319 \text{ К} [415]$$

$$\lambda = 0,158 + 0,00340 W. \quad (\text{II-68})$$

Теплофизические характеристики фарша [204]

Т, К	Нагрев	Фарш из говядины (W=74,2%, Ж=0,15%)			Фарш из свинины (W=69,1%, Ж=5,0%)		
		c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м²/с	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м²/с
293	Первичный	2750	0,38	12,0	2900	0,358	11,8
	Повторный	2700	0,40	13,9	—	—	—
303	Первичный	2800	0,39	12,2	2900	0,376	12,0
	Повторный	2700	0,40	14,0	—	—	—
313	Первичный	3000	0,40	12,5	2900	0,394	12,3
	Повторный	2700	0,41	15,0	—	—	—
323	Первичный	3000	0,41	13,0	2900	0,412	13,0
	Повторный	2700	0,42	15,2	—	—	—
333	Первичный	3000	0,44	13,9	2900	0,430	13,2
	Повторный	2700	0,45	16,0	—	—	—
343	Первичный	3000	0,45	14,1	2800	0,448	15,0
	Повторный	2550	0,50	18,3	—	—	—
353	Первичный	3000	0,50	16,0	2500	0,466	17,0
	Повторный	2500	0,55	21,2	—	—	—

Коэффициент теплопроводности сосисочного фарша без оболочки с ростом температуры увеличивается (табл. II-97), но он меньше, чем этот коэффициент фаршей из говядины или свинины (табл. II-96). Вызвано это тем, что плотность сосисочного фарша — многокомпонентной системы (формула II-63) — меньше, чем плотность фаршей из мяса (см. табл. II-94), а также низкой теплопроводностью жира.

Таблица II-97

Теплофизические характеристики фарша для сосисок без оболочки (W=65,6%, Ж=20,6%) [204]

ТФХ	Нагрев	Температура Т, К						
		293	303	313	323	333	343	353
c , Дж/(кг·К)	Первичный	3000	3200	3000	2900	2750	2500	2000
	Повторный	3000	3100	3000	2800	2600	2500	2250
λ , Вт/(м·К)	Первичный	0,350	0,358	0,366	0,374	0,382	0,390	0,398
	Повторный	0,300	0,305	0,310	0,315	0,320	0,325	0,330
$a \cdot 10^6$, м²/с	Первичный	11,0	11,0	11,5	12,0	14,0	16,0	20,0
	Повторный	10,5	11,0	11,1	11,2	12,0	13,0	16,0

Коэффициент теплопроводности готовых колбасных изделий (за исключением молочных сосисок) меньше, чем этот коэффициент фаршей, из которых они изготовлены (см. табл. II-99 и II-102, II-100 и II-97).

Таблица 11-98

Коэффициент теплопроводности λ [в Вт/(м·К)]
фарша колбас, выпускаемых в ЧССР [347]

Фарш колбасы	W, %	Температура, К		Фарш для сосисок	W, %	Температура, К	
		293	343			293	343
Ветчинной	63,7	0,43	0,68	Пražских	56,3	0,41	0,63
Пražской	51,1	0,42	0,58	Диетических	62,7	0,41	0,66
Охотничьей	58,7	0,39	0,57	Дебрецинских	54,9	0,43	0,66
Польской	44,6	0,37	0,57	Шпекачек	52,3	0,38	0,59
Туристской	55,4	0,43	0,65				

Таблица 11-99

Теплофизические характеристики колбасных изделий при охлаждении [49]

Изделие	T, К	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с
Докторская колбаса	343	994	3600	0,40	11,2
	313	998	3440	0,38	11,3
Столовая колбаса	343	991	3400	0,39	11,7
	313	997	3230	0,37	11,5
Молочные сосиски	343	941	3810	0,52	14,6
	313	1012	3650	0,49	13,3

При одновременном изменении содержания влаги ($W=40\div 80\%$) и температуры ($T=302\div 323$ К) коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] фарша из говядины равен [415]

$$\lambda = -0,670 + 0,0034 W + 0,00237 T \quad (11-69)$$

Таблица 11-100

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки ($W=62,4\%$, $J=22,4\%$) [444]

ТФХ	Температура T, К							
	343	333	323	313	303	293	283	273
c , Дж/(кг·К)	2478	2371	2391	2459	2442	2670	2563	2460
λ , Вт/(м·К)	0,31	0,30	0,28	0,27	0,24	0,23	0,21	0,19
$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	12,6	12,6	11,5	10,4	9,4	8,1	7,6	7,2
ρ , кг/м ³	1000	1021	1033	1041	1049	1057	1067	1074

Коэффициент теплопроводности фарша из говядины после первичного и повторного нагревов (см. табл. II-96), а также данные по зависимости $\lambda=f(T)$ для фарша, белки которого не скоагулировали и скоагулировали [415], показывают, что этот коэффициент фарша больше, если белки его скоагулировали. В то же время коэффициент теплопроводности сосисочного фарша больше при первичном, чем при повторном нагреве (см. табл. II-97).

С повышением влажности фаршей колбасных изделий их коэффициент температуропроводности увеличивается. Такие данные получены для фарша говяжьих сарделек, нагреваемого в закрытой форме (табл. II-101), и фаршей болгарских колбас (см. табл. II-92).

Таблица II-101

Коэффициент температуропроводности фарша говяжьих сарделек $\alpha \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) [34]

Температура в центре фарша, К	Влажность W, %			
	71,4	76,2	80,3	82,7
298—313	10,0	10,2	10,7	11,8
313—323	12,7	12,9	13,5	14,5
323—343	14,5	14,7	15,6	16,0

Для определения коэффициента температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) фаршей чехословацких колбасных изделий при $T=348\div 363$ К справедливы формулы [340]:

для копченых изделий при $W=23\div 44\%$

$$\alpha \cdot 10^8 = 8,6 + 0,078 W; \quad (\text{II-70})$$

для вареных изделий при $W=35\div 60\%$

$$\alpha \cdot 10^8 = 13,6 + 0,0083 W. \quad (\text{II-71})$$

С повышением содержания жира в фарше колбасных изделий ($T=338$ К) коэффициент температуропроводности уменьшается и при $Ж=20, 30, 40, 50\%$ соответственно составляет $12,8 \cdot 10^{-8}$; $12,5 \cdot 10^{-8}$; $12,2 \cdot 10^{-8}$ и $11,9 \cdot 10^{-8}$ $\text{м}^2/\text{с}$ [340].

Особенно заметно увеличивается коэффициент температуропроводности фарша после плавления жира в нем (табл. II-104).

В процессе разогрева от 298 до 333 К готовых говяжьих сосисок в кипящей воде зависимость α (в $\text{м}^2/\text{с}$) от T описывается формулой [230]

$$\alpha \cdot 10^8 = -72,8 + 0,27 T. \quad (\text{II-72})$$

Коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) фарша для болгарской колбасы «Русе» тем больше, чем выше его температура и влажность [271], а именно:

в процессе обжарки ($T=297\div 311$ К) при $W=56,6\div 63,1\%$

$$\alpha \cdot 10^8 = 2,6 + 0,0049T + 0,097W; \quad (\text{II-73})$$

в процессе варки ($T=316\text{—}336$ К) при $W=54,7\div 61,4\%$

$$\alpha \cdot 10^8 = -4,1 + 0,028T + 0,0115W. \quad (\text{II-74})$$

Теплофизические характеристики колбасных изделий [61]

Изделие	η , %	λ , %	ρ , кг/м ³	$\alpha \cdot 10^6$ (в м ² /с) при T , К		Коэффициент	Температура T , К						Среднее значение α в интервале 293—343 К	
							298	303	308	313	318	323—343		
				298—323	323—343									
Колбасы	67,3	15,9	1025	11,7	13,0	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3440 0,41	3770 0,45	5150 0,61	4440 0,53	4100 0,49	3440 0,41	3440 0,46	4050 0,51
	65,8	18,1	1019	21,1	13,3	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3640 0,45	4190 0,51	4650 0,57	4100 0,50	3980 0,49	3980 0,49	3980 0,54	4060 0,52
	—	—	1012	12,0	12,5	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3200 0,39	4490 0,54	3850 0,46	3850 0,46	3850 0,46	3850 0,46	3600 0,44	3770 0,46
	—	—	1013	12,0	12,5	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3200 0,39	4190 0,50	4480 0,54	3820 0,46	3820 0,46	3520 0,42	3560 0,44	3770 0,46
	—	—	1013	12,0	12,8	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	2980 0,36	3900 0,47	4578 0,55	3900 0,47	3770 0,46	3560 0,43	3560 0,46	3850 0,48
московская	—	—	1010	17,7	12,8	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3220 0,38	4850 0,57	4230 0,50	3900 0,46	3900 0,48	3900 0,50	3900 0,49	3940 0,49
докторская	—	—	1020	12,3	13,1	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3684 0,46	4731 0,59	5443 0,68	4564 0,57	4354 0,55	3643 0,45	3643 0,45	4020 0,51
докторская *	—	—	—	—	—	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	— —	— —	3363 0,44	— —	3116 0,43	2947 —	— —	— —
Сосиски молочные	70,6	15,4	1030	11,4	12,4	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3640 0,43	3820 0,45	4060 0,48	4400 0,51	3890 0,45	3820 0,45	3820 0,48	3900 0,48
Сардельки I сорта	67,8	19,0	1030	13,2	14,3	c , Дж/(кг·К) λ , Вт/(м·К)	3400 0,46	4060 0,55	4730 0,64	4400 0,60	3850 0,52	3720 0,51	3720 0,55	3940 0,56

* По данным [9].

Таблица 11-103

Коэффициент температуропроводности колбасных фаршей
 $\alpha \cdot 10^6$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) [340]

В, %	Ж, %	Температура T , К				
		333	338	343	353	363
40—68	23—44	12,5	—	12,8	13,3	16,7
—	30	—	12,2	12,5	13,6	—

Таблица 11-104

Коэффициент температуропроводности фарша
 $\alpha \cdot 10^6$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) [199]

Фарш	До плавления жира	После плавления жира
Из говяжьего жилованного мяса	7,8—8,3	14,0—14,7
Для колбасы		
полукопченой	5,2—5,6	12,5—13,6
вареной (любительской)	5,2—5,6	12,5—13,6
столовой	5,8—6,4	15,0—15,6
Для сливочных сосисок	8,9—9,2	15,8—16,4

Таблица 11-105

Коэффициент температуропроводности $\alpha \cdot 10^6$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) фарша для
 сосисок и шпекачек, выпускаемых в ЧССР [340]

Фарш	В, %	Ж, %	Температура T , К						
			303	313	323	333	343	353	363
Для сосисок	61,9	21,0	9,0	10,5	11,1	11,1	—	—	—
	64,3	22,4							
	57,8	25,0	8,3	9,7	10,3	10,0	—	—	—
	58,9	25,6							
	55,5	27,0	7,7	9,8	9,8	10,0	—	—	—
Для шпекачек	58,7	29,1							
	45,7	39,0	7,0	9,0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
	47,7	37,6	9,7	11,1	11,9	11,9	11,9	11,9	12,5
	48,6	36,9	8,3	11,6	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
	47,3	37,8	7,2	10,3	10,6	11,1	11,9	12,5	13,3

В литературе приводится обоснование параметров термической обработки колбас [172, 174, 175], формулы для нахождения продолжительности их тепловой обработки [171, 65, 243, 244, 33] и охлаждения [242, 50, 58].

Мясные консервы, субпродукты, полуфабрикаты, мясокопчености. ТФХ консервированного куриного мяса в банках при $T=300\div 347$ К

равны [230]: $c_v = 3467$ кДж/(м³·К), $\lambda = 0,52$ Вт/(м·К) и $\alpha = 15,0 \cdot 10^{-3}$ м²/с.

В процессе термообработки печени коэффициент температуропроводности ее увеличивается и составляет при $T=323, 373$ и 393 К соответственно $10,5 \cdot 10^{-3}$; $11,5 \cdot 10^{-3}$ и $13,9 \times 10^{-3}$ м²/с [230].

Коэффициент теплопроводности кроличьих почек и печени при $T=310$ К соответственно составляет 0,50 и 0,49 Вт/(м·К) [445].

Коэффициент температуропроводности мясного рулета ($W=42,6\%$, $T=298\div 333$ К) составляет $12,9 \cdot 10^{-3}$ м²/с [288].

Плотность сырого и копченого окорока, копченого бекона соответственно равна 1050, 1080 и 1040 кг/м³ [325].

Таблица II-106

Удельная теплоемкость мясных продуктов [260]

Продукт	W, %	c_p , Дж/(кг·К)
Бекон домашний	13—29	1256—1800
Ветчина свежая	47—54	2428—2638
Ветчина консервированная	40—45	2177—2345
Почки	—	3600

Таблица II-107

Коэффициент температуропроводности мясных консервов при стерилизации [245]

Консервы	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	Консервы	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Тушеное мясо	18,5	Жареные мозги	13,0
Печеночный паштет	14,0	Гуляш	16,2
Мясной паштет	12,4	Сосиски в томате	16,7
Жареное мясо	14,2	Языки в томате	14,5
Почки соте	14,7		

3. РЫБА И РЫБНЫЕ ПРОДУКТЫ

СВЕЖАЯ И ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННАЯ РЫБА

Свежая, охлажденная и мороженая рыба. Для мяса и филе рыбы, содержащих примерно равное количество влаги, удельная теплоемкость практически одинакова (табл. II-108).

Неодинаковое содержание жира в мясе рыбы не оказывает заметного влияния на его удельную теплоемкость (табл. II-109).

Таблица II-108

Удельная теплоемкость мяса и филе рыбы

Рыба	W, %	c , Дж/(кг·К)	Источ-ник	Рыба	W, %	c , Дж/(кг·К)	Источ-ник
Треска (филе)	78,0	3434	[260]	Судак	77,0	3810	[22]
	80,0	3517	[260]		78,4	3538	[22]
	80,9	3726	[22]	Морской окунь	79,1	3600	[393]
	80,3	3660	[393]	Окунь (филе)	80,0	3517	[260]
Пикша (филе)	78,0	3434	[260]	Мерлин (филе)	82,0	3601	[260]
	80,0	3517	[260]	Сайда (филе)	79	3475	[260]
	83,6	3684	[393]				
Сом	78,1	3685	[389]				
Сазан	78,0	3726	[22]				

Таблица II-109

Удельная теплоемкость мяса и филе рыбы [22, 230]

Рыба	T, К	W, %	Ж, %	c , Дж/(кг·К)
Треска (филе)	—	80,9	0,3	3714
Сазан (спинка)	—	74,4	19,4	3659
Осетр (спинка)	—	70,8	30,9	3643
Судак	273—298	76,8	1,0	3798
Рыба тощая (судак)	—	—	—	3517
Рыба жирная (севрюга)	273—298	—	—	3417

Удельная теплоемкость мяса рыбы (при изменении температуры от 275 до 291 К) практически постоянна (табл. II-110).

Таблица II-110

Удельная теплоемкость мяса рыбы при T = 275—291 К

T, К	c , Дж/(кг·К) [393]			T, К	c , Дж/(кг·К) [230]
	пикша (W=83,6%)	треска (W=80,3%)	морской окунь (W=79,1%)		сом (W=78,1%)
275	3684	3642	3601	277,4	3433
279	3684	3642	3601	283,1	3433
283	3726	3684	3601	288,5	3433
287	3726	3684	3601	—	—
291	3726	3684	3601	—	—

Удельная теплоемкость мяса пикши [в Дж/(кг·К)] при $W > 28\%$ и $T = 273$ К равна [393]:

$$c = 1675 + 25,1W. \quad (II-75)$$

Анализ экспериментальных данных [260, 393, 22, 422, 230, 383, 389, 371, 477] показал, что формула (II-75) надежно описывает зависимость $c=f(W)$ для мяса рыбы разных видов при $T=273$ К.

При $T=273 \div 283$ К и $W=60 \div 80\%$ удельная теплоемкость мяса рыбы [в Дж/(кг·К)] может быть определена по формуле [683]

$$c = 41,87W + (3124 - 5T) \cdot (1 - 0,01W). \quad (II-76)$$

Чем больше в мясе рыбы содержится жира, тем меньше ее плотность. Так, для сельди при $Ж=2-3\%$ $\rho=1067$ кг/м³, а при $Ж=12\%$ — 1057 кг/м³ [22].

С увеличением влажности мяса рыбы плотность ее также понижается. Например, для судака при $W=76,5\%$ $\rho=1072-1068$ кг/м³, а при $W=78,2\%$ — 1063—1065 кг/м³ [22].

Плотность целой рыбы с увеличением ее массы имеет тенденцию к понижению. У сельди и судака это явление выражено более заметно, чем у леща (табл. II-111 и II-112).

Таблица II-111

Плотность рыбы при $T=288$ К [22]

Сельдь	масса, г	390	470	534	582	623	662	674	726
	ρ , кг/м ³	1109	1082	1061	1073	1083	1067	1078	1066
Лещ	масса, г	386	429	487	520	568	638	726	811
	ρ , кг/м ³	1021	1026	1015	1032	1033	1022	1007	1020

Таблица II-112

Таблица II-113

Плотность судака при $T=288$ К [22]

Масса, г	350	500	1800	3400
ρ , кг/м ³	996	987	984	955

Плотность зеркального карпа ρ (в кг/м³) при $T=288$ К [22]

Масса, г	Состояние рыбы		
	живая	в покое	оглушенная
228	1037	—	1002
231	1011	1003	1001
369	997—987	—	1002

На плотность рыбы оказывают влияние такие факторы, как ее состояние (табл. II-113) и разделка (табл. II-114).

Из данных табл. II-113 видно, что у живой рыбы, находящейся в движении, плотность может изменяться в довольно широком диапазоне, а когда рыба находится в состоянии покоя или оглушения, практически постоянна и близка к 1000 кг/м³.

Таблица II-114

Плотность рыбы при $T=288\text{ K}$
[22]

Рыба	Неразделанная		Потрошенная	
	масса, г	ρ , кг/м³	масса, г	ρ , кг/м³
Карп	547	986	451	1049
зеркальный	356	989	313	1061
	225	990	187	1062
Сельдь	578	1035	515	1053
волжская	512	1057	420	1067

Таблица II-115

Плотность чешуи ρ (в кг/м³)
[22]

Рыба	Влажность W , %		
	0	18,7	52,4
Карп	1554	1496	—
Сазан	1506	—	1259

Плотность чешуи (табл. II-115) заметно больше плотности мяса рыбы (табл. II-116).

Таблица II-116

Плотность мяса рыбы при $T=288\text{ K}$ [128]

Рыба	W , %	J , %	ρ , кг/м³	Отклонения ρ , кг/м³
Судак	77,5	1,00	1064	1058—1072
Сазан	77,9	8,80	1060	1058—1065
Лещ	77,9	12,00	1060	1059—1062
Осетр	70,8	30,97	1059	1058—1061
Треска (филе)	80,5	0,30	1052	1047—1057
Сельдь	—	—	1054	1048—1060
Карп зеркальный	80,6	7,98	1054	1052—1055

Плотность кожи карпа без чешуи и с чешуей при $T=288\text{ K}$ соответственно составляет 1119 и 1216 кг/м³ [22].

Таблица II-117

Плотность рыбы и филе ρ (в кг/м³) [22]

Рыба	Состояние рыбы				Филе	
	парная		охлажденная потрошенная	мороженная неразделанная	охлажденное	мороженое
	неразделанная	потрошенная				
Судак	929	1080	—	967	1078	1026
Сом	933	1050	—	939	1071	1032
Осетр	—	—	1056	1022	1057	1032

Для мяса рыбы при примерно одинаковых значениях влажности и температуры его коэффициент теплопроводности различается менее чем на 36% (табл. II-118). Это различие, по-видимому, обусловлено не столько влиянием на теплопроводность мяса рыбы температуры, содержания жира и структуры ткани, сколько использованием неравноценных для влажных материалов методов определения ТФХ. В тех случаях, когда коэффициент теплопроводности мяса разных видов рыбы определялся одним и тем же методом (например [259, 22]), его значения различаются менее чем на 5%.

Аналогичный вывод сделан [112] по результату определения коэффициента теплопроводности некоторых дальневосточных пород рыб (треска, минтай, горбуша, угольная, палтус), содержащих 0,13—11,5% жира.

Таблица II-118

Коэффициент теплопроводности мяса рыбы

Рыба	W, %	T, K	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	Источник
Треска	—	275	—	0,54	[286]
	—	274	—	0,46	[259]
	—	274	—	0,47	[22]
	—	293	—	0,47	[257]
	77	—	1043	0,45	[22]
Судак	80	273+288	1070	0,52	[22]
	—	274	—	0,43	[259]
	76	273—288	1045	0,47	[22]
Пикша	—	274	—	0,47	[22]
Лещ	—	274	—	0,47	[259]
Осетр	74,1	—	1040	0,43	[22]
Карп	—	274	—	0,46	[259]
Сазан	75,2	273—288	1047	0,44	[22]
Лосось	—	273	—	0,46	[422]
Тунец	—	273—278	—	0,50	[22]
	—	273	—	0,58	[426]

Таблица II-119

Коэффициент теплопроводности мяса рыбы

Рыба	W, %	J, %	λ , Вт/(м·К)
Тунец	73,01	0,17	0,44
Акула	70,59	4,28	0,39
Желтый хвост	55,14	11,11	0,31

Таблица II-120

Коэффициент температуропроводности мяса сазана [22]

Часть тела рыбы	W, %	J, %	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Спинка	75,2	8,61	1046	11,67
	73,8	10,78	1052	11,00
	77,8	12,76	1047	11,39
Брюшная часть	73,5	15,90	1049	10,97

Нельзя согласиться с выводами японских исследователей о том, что чем меньше жира содержится в мясе рыбы, тем больше его коэффициент теплопроводности (табл. II-119), поскольку в опытах этих исследователей мясо имело неодинаковую влажность, и, видимо, содержание влаги, а не жира оказало влияние на теплопроводность.

Различное содержание жира в мясе сазана практически не влияет на его коэффициент температуропроводности (табл. II-120).

Коэффициент температуропроводности мяса рыбы ($W > 70\%$), содержащего $J = 0,30 \div 21,58\%$, практически одинаков (табл. II-121).

Т а б л и ц а II-121

Коэффициент температуропроводности мяса рыбы [230, 22]

Рыба	W, %	J, %	T, K	$a \cdot 10^8$, м ² /с	Рыба	W, %	J, %	T, K	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Треска	—	—	274	13,1	Карп	—	—	274	13,7
	77,5	0,3	273—	11,8	Сазан				
			298		спинка	75,2	8,61	273—	11,7
Судак	—	—	274	12,5				298	
	76,1	0,9	273—	12,0	брюшная	73,5	15,9	273—	11,0
			298		часть			298	
			274	13,9	Некоторые ви-	81	0,13—	293	13,0
Лещ	77,1	8,0	273—	11,6	ды дальневос-		11,5		
			298		точных рыб				
Осетр	74,1	21,58	273—	11,28					
			298						

Коэффициент температуропроводности мяса рыбы тем больше, чем меньше его плотность (табл. II-122).

Т а б л и ц а II-122

Коэффициент температуропроводности мяса рыбы
 $a \cdot 10^8$ (в м²/с) при $T = 273 \div 285$ K

Рыба	Плотность ρ , кг/м ³			
	1045	1050	1055	1060
Сазан	12,1	11,6	11,1	10,7
Судак	12,0	11,1	10,7	—

Теплофизические характеристики мяса рыбы

Рыба	T, K	$W, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Источник
Треска	289	—	992	3684	0,54	14,4	[314]
	293	80	1020	3684	0,46	12,1	[230]
	—	83	997	3684	0,54	14,7	[422]
	293	—	1052	3726	0,45	11,7	[22]
Лосось	—	73	980	3517	0,50	14,4	[422]
Судак	274	—	1070	3226	0,43	12,5	[230]
	273	80	1070	3475	0,52	14,0	[22]
	293	—	1054	3810	0,47	12,0	[22]
Сазан	293	—	1060	3864	0,44	11,3	[22]
Осетр	293	—	1059	3643	0,43	11,3	[22]

Таблица II-124

Мясо рыбы в процессе нагрева.
Температурный коэффициент объемного расширения мяса разных рыб заметно различается (табл. II-124).

При одинаковой температуре коэффициент теплопроводности вдоль волокон трески больше, чем поперек их, а с повышением температуры этот коэффициент увеличивается (табл. II-125).

Температурный коэффициент объемного расширения мяса рыбы $\beta \cdot 10^3$ ($^{\circ}K^{-1}$) [22]

Рыба	Температура T, K	
	283—323	323—348
Щука	0,95	3,40
Окунь	0,50	1,48
Треска	0,30	4,70

Таблица II-125

Коэффициент теплопроводности мяса трески λ [$\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$] [257]

Мясо трески	Температура T, K				
	293	313	333	353	373
Вдоль волокон	0,50	0,52	0,53	0,53	0,53
Поперек волокон	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49

Зависимость λ [в Вт/(м·К)] трескового филе от температуры K выражается следующими формулами [257]:

$$\text{при } T = 293 + 313 \text{ К } \lambda = 0,18 + 0,001T; \quad (\text{II-77})$$

$$\text{при } T = 323 + 373 \text{ К } \lambda = -0,15 + 0,002T. \quad (\text{II-78})$$

Т а б л и ц а II-126

Коэффициент теплопроводности мяса рыбы

Рыба	$T, \text{ К}$	$W, \%$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	Источник
Макрель	318—323	78,9	0,58	[291]
Сардина	318—323	77,6	0,60	[291]
Лосось	296	—	0,55	[422]
Пикша	333	—	0,68	[22]

Коэффициент теплопроводности мяса макрели увеличивается с повышением температуры, а внесение в него растительного масла заметно уменьшает этот коэффициент (табл. II-127).

Т а б л и ц а II-127

Коэффициент теплопроводности мяса макрели
 λ [в Вт/(м·К)] [22]

Образец	Температура $T, \text{ К}$				
	283	303	323	348	373
Макрель	0,42	0,44	0,52	0,58	0,63
Макрель с 5% масла соевых бобов	—	0,37	0,42	0,49	0,50

Обжаренная и вареная рыба. ТФХ мяса камбалы, ставриды, окуня, терпуга, хека, трески, карася, сига, скумбрии и меч-рыбы при $W=61 \div 81\%$ не зависят от технологической обработки (обжарка или варка). При нагреве внутренних слоев мяса рыбы от 273 до 363 К их ТФХ определяются влажностью [214]:

$$c = 1671 + 25,5W; \quad (\text{II-79})$$

$$\lambda = 0,298 + 0,0029W; \quad (\text{II-80})$$

$$a \cdot 10^8 = 14,7 - 0,0083W, \quad (\text{II-81})$$

где c выражена в Дж/(кг·К), λ — в Вт/(м·К), a — в м²/с.

Формула для определения продолжительности охлаждения обжаренной рыбы, исходя из ее ТФХ, приведена в [94].

Удельная теплоемкость вареной осетрины в интервале 373—293 К равна 3685 Дж/(кг·К) [22].

Сушеная рыба. Рыба, высушенная конвективным способом.

Для удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] сухих веществ морских рыб (пикша, треска) в интервале 243—293 К справедлива формула [400]

$$c_{св} = 76 + 3,52T. \quad (\text{II-82})$$

Таблица 11-128

Удельная теплоемкость сухих веществ мяса рыбы

Рыба	Ж, %	T, К	$c_{св}$, Дж/(кг·К)	Источ- ник	Рыба	Ж, %	T, К	$c_{св}$, Дж/(кг·К)	Источ- ник
Хек	1,9	288	1633	[91]	Треска	0,4	288	1339	[22]
Сазан	2,7	282	1558	[22]	—	—	278	1147	[400]
Судак	0,8	333	1381	[22]	—	—	—	1549	[230]
—	—	282	1474	[22]	Пикша	0,3	282	1212	[393]
—	—	288	1356	[22]	Щука	0,7	288	1381	[91]
Тощая морская рыба	—	303	1339	[37]	Минтай	0,4	288	1423	[91]

Для сухих веществ мышечной ткани трески $\rho = 1300$ и $\rho_n = 550$ кг/м³ [22].

Таблица 11-129

Удельная теплоемкость сухих веществ мяса рыбы в интервале температур

Рыба	Температурный интервал, К	$c_{св}$, Дж/(кг·К)	Источник
Сазан	273—290	1558	[22]
	290—373	1681	[22]
Тощая морская рыба	233—273	1151	[37]
	273—313	1361	[37]
Треска	243—293	1080	[400]
	263—293	1147	[400]

Для некоторых видов рыб их $\lambda_{св}$ [в Вт/(кг·К)] и $a_{св}$ (в м²/с) при $\rho_n = 650 \div 850$ кг/м³ и $T = 288$ К можно определить по формулам [91]:

$$\lambda_{св} = A + 0,00023(\rho_n - 650); \quad (\text{II-83})$$

$$a_{св} \cdot 10^8 = B + 0,0055(\rho_n - 650). \quad (\text{II-84})$$

Постоянные члены равны: $A = 0,13$ (для хека) и 0,09 (для щуки и минтая), $B = 11,7$ (для хека) и 10,2 (для щуки и минтая).

Таблица II-130

Теплофизические характеристики сухих веществ мяса рыбы при $T=288\text{ К}$ [91, 22]

Рыба	$\rho_{\text{св}}, \text{кг/м}^3$	$\lambda_{\text{св}}, \text{Вт/(м·К)}$	$\alpha_{\text{св}} \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Минтай	760	0,115	10,8
Щука	760	0,115	10,8
Хек	760	0,115	12,3
Судак	761	0,13	12,0

Таблица II-131

Удельная теплоемкость мяса сушеной трески с [в Дж/(кг·К)] [400]

$T, \text{ К}$	Влажность $W, \%$			
	2,14	4,51	7,02	9,28
243—293	1130	1180	1256	1381
263—283	1188	1256	1386	1507

С повышенным влажностью мяса сушеной рыбы, например трески, ее удельная теплоемкость существенно увеличивается — примерно на 36—46 Дж/(кг·К) на один процент влажности (табл. II-131).

В интервале $W=0\div40\%$ удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] мяса тощих рыб ($T=273\div313\text{ К}$) равна [371]:

$$c = 1256 + 41,8W. \quad (\text{II-85})$$

Экспериментальная удельная теплоемкость мяса рыбы при $W=16$ и 18% [230] и вычисленная по формуле (II-85) различаются менее чем на 10% .

Коэффициент теплопроводности сушеного мяса рыбы не зависит от способа сушки и определяется только содержанием влаги. Для коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] мяса трески, минтая, горбуши, угольной и палтуса при $W=63\div81\%$ и $T=293\text{ К}$ справедлива формула [210]

$$\lambda = 0,086 + 0,00581W. \quad (\text{II-86})$$

Таблица II-132

Удельная теплоемкость рыбы [260]

Рыба	$W, \%$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$	Рыба	$W, \%$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$
Копченая	60	2931	Сельдь холодного	70	3187
Мокрого посола	—	3182	копчения		
Сухого посола	16—20	1706	Сельдь горячего	64	2970
			копчения		

Совместной обработкой экспериментальных данных [91, 22, 403, 291, 112] по $\alpha=f(W)$ для мяса разных видов рыбы в интервале $W=20\div60\%$ при $T=288\div303\text{ К}$ получена формула [84]

$$\alpha \cdot 10^8 = 5,85 + 0,0375W, \quad (\text{II-87})$$

где α выражена в $\text{м}^2/\text{с}$.

Формулы для определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности мяса сушеных рыб [291]

Рыба	W, %	ρ , кг/м ³	T, К	λ , Вт/(м·К)	a , м ² /с
Макрель	57—22	630	318—323	$\lambda=0,174+$ $+0,0030W$	—
	37,6	380—630	318—323	$\lambda=0,047+$ $+0,0032p$	—
	57—22	630	273—318	—	$a \cdot 10^8=6,37+$ $+0,028W$
Сардина	50,4—	630	318—323	$\lambda=0,135+$ $+0,0040W$	—
	22,2	—	—	—	—
	22,0	380—323	318—323	$\lambda=0,080+$ $+0,00023p$	—
	57—22	630	273—318	—	$a \cdot 10^8=5,55+$ $+0,042W$

Рыба, высушенная сублимацией, и продукты из нее. Коэффициент теплопроводности лосося ($p=19,3$ Па), трески ($p=10,6$ Па) и окуня ($p=10,6$ Па) соответственно составляет 0,0145; 0,0190; 0,0225 Вт/(м·К) [363].

Для сублимированной рыбы $\lambda=0,019 \div 0,035$ Вт/(м·К) [286], а для мяса креветок ($W=6,8 \div 7,4\%$) при $p=48$ Па и $T=275 \div 276$ К $\lambda=0,026 \div 0,030$ Вт/(м·К) [182].

С повышением давления и температуры коэффициент теплопроводности судака увеличивается (табл. 11-134).

Таблица 11-134

Коэффициент теплопроводности судака $\lambda \cdot 10^2$ [в Вт/(м·К)] [181]

Сушак	p , Па	Температура T, К					
		253	258	263	268	273	278
Фаршированный	53,2	—	6,6	7,2	7,8	8,0	8,2
	37,2	4,4	5,2	5,8	6,1	—	—
Бланшированный	38,5	—	4,7	5,0	5,1	5,2	5,2

ТФХ бланшированного судака при $p=38,5$ Па и $T=263$ К равны [181]: $c_v=1209$ кДж/(м³·К); $\lambda=0,05$ Вт/(м·К); $a=4,1 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

ТФХ фаршированной трески с повышением давления увеличиваются (табл. 11-135), а при нормальном атмосферном давлении они больше, чем аналогичные характеристики сухих веществ трески (см. табл. 11-128), так как в сублимированной фаршированной рыбе содержится 5—7% влаги.

Теплофизические характеристики фаршированной трески при
 $T = 288 \div 298 \text{ K}$ [183]

ТФХ	Давление p , мПа					
	0,033	0,076	0,080	1,73	15,91	101,30
$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	6,6	7,3	7,9	11,8	14,2	15,4
$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с	4,2	5,0	7,3	10,2	15,6	15,0
c_v , кДж/(м ³ ·К)	1571	1460	1082	1157	910	1027

ПРОДУКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ РЫБЫ

Фарш. Удельная теплоемкость фарша практически не отличается от аналогичной теплофизической характеристики мяса рыбы, из которого он приготовлен. Поэтому данные по $c_{\text{св}}$ и c мяса рыбы, которые приведены выше, справедливы и для фарша.

Коэффициент объемного теплового расширения фарша меньше этого показателя мяса рыбы, из которого он приготовлен (см. табл. II-148), так как после измельчения отдельные кусочки мяса неплотно прилегают друг к другу.

Таблица II-136

Теплофизические характеристики фарша из минтая [90]

Образец	T , К	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м ² /с
Мороженный брикет фарша	266	920	—	—
Дефростированный брикет фарша	273	980	0,72	20,0
Фарш после измельчения в мясорубке	283	940	0,67	19,7
Котлетная масса	288	1020	0,93	22,0

В процессе нагрева фарша, находящегося во влагонепроницаемой металлической оболочке, его ТФХ увеличиваются как с повышением температуры обогревающего воздуха (табл. II-137), так и с ростом скорости его движения (табл. II-138).

Коэффициенты теплопроводности [в Вт/(м·К)] и температуропроводности (в м²/с) брикета фарша из щуки в процессе его охлаждения (от 303 до 273 К) тем больше, чем влажнее фарш [91].

$$\lambda = 0,090 + 0,0048W. \quad (\text{II-88})$$

$$\alpha \cdot 10^3 = 10,3 + 0,034W. \quad (\text{II-89})$$

Формулы (II-88) и (II-89) справедливы при $W = 79,7 \div 88,3\%$.

Т а б л и ц а II-137

Теплофизические характеристики фарша ($\rho=995 \text{ кг/м}^3$) при нагреве в воздухе ($v=2,8 \text{ м/с}$) [21]

Фарш	λ [в Вт/(м К)] при T , К			$a \cdot 10^5$ (в м ² /с) при T , К		
	353	387	401	353	387	401
Из щуки ($W=80,4\%$)	0,46	0,50	0,57	13,0	13,9	15,3
Из окуня ($W=78,7\%$)	0,41	0,42	0,43	11,3	11,7	12,0
Из трески ($W=80,9\%$)	0,43	0,49	0,52	12,0	13,3	14,2

Т а б л и ц а II-138

Теплофизические характеристики фарша ($\rho=995 \text{ кг/м}^3$) при нагреве в воздухе ($T=387 \text{ К}$) [21]

Фарш	λ [в Вт/(м К)] при $v_{\text{н}}$, м/с			$a \cdot 10^5$ (в м ² /с) при $v_{\text{н}}$, м/с		
	1,33	2,80	4,23	1,33	2,80	4,23
Из щуки ($W=80,4\%$)	0,47	0,50	0,60	13,1	13,9	16,8
Из окуня ($W=78,7\%$)	0,36	0,42	0,49	10,7	11,7	13,6
Из трески ($W=80,9\%$)	0,45	0,49	0,58	12,8	13,3	15,8

При нагреве в кипящей воде брикета фарша из минтая его коэффициенты тепло- и температуропроводности существенно зависят от температуры фарша (табл. II-139).

Т а б л и ц а II-139

При сопоставлении коэффициентов тепло- и температуропроводности фарша и котлетной массы из минтая (см. табл. II-136) видно, что чем больше плотность продукта, тем выше коэффициенты.

Сосиски в оболочке. ТФХ сосисок из смеси фарша из морского окуня и особого фарша из минтая определены в зависимости от вида оболочки, диаметра изделия и плотности массы. Экспериментально установлено (табл. II-141), что вид и толщина оболочки δ , а также ее влагонепроницаемость оказывают влияние на ТФХ сосисок.

Диаметр сосисок (21—62 мм) не оказал влияния на их ТФХ.

Сосиски без оболочки. В процессе термического формирования сосисок, помещенных в металлическую оболочку, которая обогревается воздухом, значения их ТФХ увеличиваются как с повышением температуры воздуха (табл. II-143), так и с ростом скорости его движения (табл. II-144).

Теплофизические характеристики фарша из минтая ($\rho=980 \text{ кг/м}^3$) [90]

Температура фарша, К	λ , Вт/(м К)	$a \cdot 10^5$, м ² /с
273—343	0,46	12,8
273—373	0,72	20,0
343—373	1,25	33,4

Таблица II-140

Теплофизические характеристики фарша

Фарш	T, K	$W, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	Источник
Из щуки	273—303	84	977	12,5	[176]
Рыбный	293—362	—	—	16,7	[193]
Из леща	278—323	—	—	15,0	[179]
Из минтая	273—343	—	980	12,8	[90]

Таблица II-141

Теплофизические характеристики рыбных сосисок в оболочке
(диаметр 29,4 мм; длина 155 мм) при варке в воде ($T=363 K$)
до 348 K [22]

Оболочка	$\delta \cdot 10^3, \text{мм}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	Примечание
Сарановая	4,0	1100	0,38	11,8	—
	5,5	1100	0,40	11,6	—
Вискозная искус-	5,0	1400	0,51	12,1	Выпускается по
ственная					ТУ 6-06-466—75
Коллагенная	5,0	1400	0,45	10,2	Производство фир-
искусственная					мы «Калле» (ФРГ)
Сарановая	4,0	1100	0,38	11,6	Производство Япо-
					нии (для нагрева
	4,0	1100	0,43	12,8	до 360 K)
					Производство Япо-
					нии (для нагрева
					до 393 K)

Таблица II-142

Теплофизические характеристики сосисок в вискозной
оболочке при варке в воде ($T=363 K$) до 348 K [22]

ТФХ	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$			
	1100	1240	1350	1490
$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	0,46	0,50	0,52	0,54
$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	13,4	13,0	12,4	11,7

Таблица II-143

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки
($\rho = 970 \text{ кг/м}^3$) при их формировании в воздухе ($v = 2,8 \text{ м/с}$) [21]

Сосиски	λ [в Вт/(м·К)] при $T, \text{ К}$			$a \cdot 10^3$ (в м ² /с) при $T, \text{ К}$		
	353	387	401	353	387	401
Из шуки ($W = 69,7\%$)	0,43	0,45	0,49	12,9	13,3	14,7
Из окуня и трески ($W = 69,8\%$)	0,38	0,43	0,45	11,8	13,1	13,6

Таблица II-144

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки
($\rho = 970 \text{ кг/м}^3$) при их формировании в воздухе ($T = 387 \text{ К}$) [21]

Сосиски	λ [в Вт/(м·К)] при $v, \text{ м/с}$					$a \cdot 10^3$ (в м ² /с) при $v, \text{ м/с}$				
	0,10	1,33	2,80	3,36	4,23	0,10	1,33	2,80	3,36	4,23
Из шуки ($W = 69,7\%$)	0,27	0,36	0,45	0,46	0,48	8,1	10,7	13,3	13,5	14,0
Из окуня и трески ($W = 69,8\%$)	0,41	0,42	0,43	0,45	0,49	12,3	12,7	13,1	13,2	14,5

Таблица II-145

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки при
их формировании в воздухе ($T = 387 \text{ К}$ и $v = 2,8 \text{ м/с}$) [21]

Сосиски	λ [в Вт/(м·К)] при $\rho, \text{ кг/м}^3$			$a \cdot 10^3$ (в м ² /с) при $\rho, \text{ кг/м}^3$		
	970	1065	1226	970	1065	1226
Из шуки	0,45	0,46	0,48	13,3	12,3	11,5
Из окуня и трески	0,43	0,45	0,46	13,1	12,5	11,1

В процессе варки сосисок в воздухе (относительная влажность 10—30%) коэффициенты тепло- и температуропроводности увеличиваются с повышением температуры воздуха (табл. II-146) и уменьшаются с ростом скорости его движения (табл. II-147).

Температурный коэффициент объемного расширения сосисок заметно возрастает при $T > 313 \text{ К}$ (табл. II-151, II-148), что вызвано расширением белков сосисок в процессе их коагуляции.

Дано [20] обоснование режима формирования и варки сосисок без оболочки, исходя из их ТФХ.

Таблица II-146

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки при их варке в воздухе ($v=3,36$ м/с) [21]

Сосиски	λ [в Вт/(м·К)] при T , К				$a \cdot 10^3$ (в м²/с) при T , К			
	343	353	363	373	343	353	363	373
Из щуки ($\rho = 974$ кг/м³)	0,23	0,29	0,32	0,36	7,2	8,9	10,0	11,1
Из окуня и трески ($\rho = 865$ кг/м³)	0,23	0,24	0,31	0,43	6,7	7,5	9,2	11,7

Таблица II-147

Теплофизические характеристики сосисок без оболочки при их варке в воздухе ($T=363$ К) [21]

Сосиски	λ [в Вт/(м·К)] при v_n , м/с					$a \cdot 10^3$ (в м²/с) при v_n , м/с				
	0,10	1,33	2,80	3,36	4,28	0,10	1,33	2,80	3,36	4,28
Из щуки ($\rho = 966$ кг/м³)	0,59	0,45	0,36	0,32	0,29	16,7	13,9	11,1	10,0	8,9
Из окуня и трески ($\rho = 1041$ кг/м³)	—	0,42	0,35	0,31	0,28	—	12,3	10,5	9,3	8,2

Таблица II-148

Температурный коэффициент объемного расширения рыбы, фарша и сосисок $\beta \cdot 10^3$ (в К⁻¹)

Материал	Температура T , К		Материал	Температура T , К	
	283—313	313—343		283—313	313—343
Щука			Треска		
кусок	0,95	3,40	кусок	0,30	4,70
фарш	0,35	2,75	фарш	0,31	2,30
Сосиски из щуки	0,25	2,50	Сосиски из окуня и трески	0,45	1,80
Окунь					
кусок	0,50	1,48			
фарш	0,10	1,20			

Икра. Коэффициенты теплопроводности [в Вт/(м·К)] и температуропроводности (в м²/с) зернистой черной икры ($\rho=900$ кг/м³) в диапазоне 269—333 К описываются следующими формулами [227]:

$$\lambda = 0,442 - 0,0139(T - 273) + 0,000013(T - 273)^2; \quad (\text{II-90})$$

$$\alpha \cdot 10^8 = 20,1 - 0,53(T - 273) + 0,0072(T - 273)^2. \quad (\text{II-91})$$

НЕРЫБНЫЕ ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ МОРЯ

Таблица 11-149

*Теплофизические характеристики
икры
($\rho=1100$ кг/м³) [218]*

Сок криля. Для удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] сока ($n=16,4\%$) в интервале $T=313\div 363$ К справедлива формула [24]:

$$c = 4187 - 17,75n. \quad (\text{II-92})$$

Плотность сока (в кг/м³) в зависимости от содержания сухих веществ ($n=9,5\div 46,1\%$) при $T=293$ К равна [24]:

$$\rho = 1000 + 1,78n. \quad (\text{II-93})$$

Плотность сока (в кг/м³) в зависимости от температуры ($T=273\div 303$ К) при $n=17,4\%$ составляет [24]:

$$\rho = 1064 - 0,13T. \quad (\text{II-94})$$

Принципиальное отличие изменения коэффициентов тепло- и температуропроводности сока криля и жидкостей, не содержащих белков, заключается в том, что для сока эти коэффициенты зависят не только от температуры, но и от скорости нагрева (табл. II-150).

Таблица II-150

Теплофизические характеристики сока криля ($n=16,4\%$) в зависимости от температуры и скорости нагрева [24]

T, K	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$v, \text{К}/\text{мин}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
317	0,66	16,1	4,7	0,53	12,8
327	0,67	16,3	5,1	0,57	13,9
338	0,68	16,6	7,6	0,67	16,3
348	0,72	17,6	13,7	0,68	16,7
361	0,78	19,2	—	—	—

Паста «Океан». Плотность пасты «Океан» с ростом температуры уменьшается, особенно существенно при $T=323\div 368$ К (табл. II-152).

Таблица 11-151

Теплофизические характеристики сока крыля в зависимости от содержания сухих веществ и скорости нагрева [24]

п, %	ρ , кг/м ³	$\vartheta=4,7$ К/мин		$\vartheta=13,7$ К/мин		$\vartheta=22,6$ К/мин	
		λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
9,5	1035	0,59	14,1	—	—	—	—
16,4	1053	0,53	12,8	0,68	16,7	0,79	19,2
22,9	1080	0,50	12,6	0,54	13,3	0,57	13,9
46,1	1118	0,45	12,0	—	—	—	—

Таблица 11-152

Плотность пасты «Океан» [86]

T, К	283	293	313	328	343	358	368
ρ , кг/м ³	926	924	921	919	900	821	744

Таблица 11-153

Теплофизические характеристики пасты «Океан» ($\rho=974$ кг/м³, $W=69\%$) [86]

Температура воды, К	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
333	0,44	13,5
353	0,45	14,0
373	0,47	14,6

При нагреве без внешнего массообмена пасты «Океан» ($\rho=981$ кг/м³, $W=73\%$) в воздухе ($T=333\div 393$ К и $v_{\text{в}}=0,50\div 5,50$ м/с) ее ТФХ в интервале $283\div 368$ К практически остаются постоянными: $c=3320$ Дж/(кг·К); $\lambda=0,43$ Вт/(м·К) и $a=13,2 \times 10^{-8}$ м²/с, в то время как при нагреве без внешнего массообмена в воде при интенсивном перемешивании значения ее ТФХ увеличиваются (табл. 11-153).

Таблица 11-154

Теплофизические характеристики пасты «Океан», нагреваемой в воздухе от 283 до 368 К при наличии внешнего массообмена [91]

T, К	п, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	п, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
$v_{\text{в}}=1,7$ м/с					$v_{\text{в}}=4,1$ м/с			
333	—	—	—	—	17,3	903	0,24	7,70
353	21,6	881	0,24	7,94	22,0	893	0,22	7,14
373	23,7	872	0,25	8,26	25,4	865	0,20	6,86
393	24,9	866	0,26	8,84	29,6	842	0,18	6,15

Другие продукты моря. Удельная теплоемкость креветок ($T = -273 \div 300$ К) при $W = 78,6\%$ и $W = 83\%$ соответственно равна 3559 [389] и 3601 Дж/(кг·К) [260].

ТФХ кальмара ($W = 20,1\%$; $J = 6,5\%$) составляют [418]: $\rho = -1060,6$ кг/м³; $c = 3575$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,83$ Вт/(м·К) и $a = -24,5 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Насыпная плотность черноморской мидии составляет 600 кг/м³, а удельная теплоемкость — 2203 (целых) и 1045 Дж/(кг·К) (створок) [22].

Таблица 11-155

Плотность креветок ρ (в кг/м³) в среде различных газов [300]

Креветки	Гелий	Азот	Воздух
Сырые	1335	1389	—
Вареные	1293	1335	1358

4. МОЛОКО И МОЛОЧНЫЕ ПРОДУКТЫ

МОЛОКО

Обезжиренное молоко. Удельную теплоемкость [в Дж/(кг·К)] обезжиренного молока рекомендуется [80] определять по формуле аддитивности. Необходимые для этого значения $c_{св} = f(T)$ обезжиренного молока равны:

при $273 < T < 308$ К [3]

$$c_{св} = -3353 + 15,9T; \quad (II-95)$$

при $313 < T < 353$ К [439]

$$c_{св} = -1712 + 11,3T; \quad (II-96)$$

при $303 < T < 353$ К [117]

$$c_{св} = -3242 + 16,8T. \quad (II-97)$$

Удельная теплоемкость обезжиренного молока ($n = 9\%$), полученная в различных температурных интервалах: 273—333 К [292], 273—353 К [386], 273—333 К [260], 278—328 К [379], а также данные [101] и рассчитанная по формуле аддитивности с использованием $c_{св}$ обезжиренного молока (формулы II-95—II-97), различаются между собой незначительно. Однако при большом содержании сухих веществ ($n = 20 \div 40\%$) для определения $c_{св}$ целесообразно использовать формулу (II-97). Поэтому для определения удельной теплоемкости обезжиренного молока [в Дж/(кг·К)] ($n = 9 \div 40\%$, $T = -273 \div 353$ К) рекомендуется формула [117]

$$c = \frac{4187 + (-3242 + 16,8T)(100 - W)}{100}. \quad (II-98)$$

В интервале $T = 274 \div 283$ К и $\gamma = 8,2 \div 10,2\%$ плотность обезжиренного молока (в кг/м³) равна [439]:

$$\rho = 1055 - 0,179T + 3,14n. \quad (II-99)$$

Совместная обработка экспериментальных данных по плотности обезжиренного молока (в кг/м^3) в интервалах $T=273\div 363$ К и $n=8,2\div 45\%$ позволила рекомендовать формулу [80]

$$\rho = \frac{\rho_w W + \rho_{св} (100 - W) \varphi}{100} \quad (\text{II-100})$$

где ρ_w — плотность воды при температуре обезжиренного молока, кг/м^3 ;

$\rho_{св}$ — плотность сухих веществ обезжиренного молока, равная 1600 кг/м^3 ;

φ — коэффициент, учитывающий наличие газов в обезжиренном молоке.

Он равен 0,86 при $T=273\div 293$ К и 0,83 при $T=293\div 363$ К.

Результаты экспериментальных работ по теплопроводности [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$] обезжиренного молока ($n=9\%$, $T=278\div 348$ К [322] и $T=293\div 353$ К [260], а также данные по $\lambda=f(n)$ при $n=9, 20, 30$ и 40% [348]) позволили рекомендовать формулу, составленную по правилу аддитивности [80],

$$\lambda = \frac{\lambda_w W + \lambda_{св} (100 - W)}{100} \quad (\text{II-101})$$

где λ_w — коэффициент теплопроводности воды при температуре обезжиренного молока, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

$\lambda_{св}$ — расчетный коэффициент теплопроводности сухих веществ обезжиренного молока, равный $0,31 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Формула (II-101) справедлива при $T=278\div 353$ К и $n=9\div 40\%$.

Коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) обезжиренного молока в интервалах $T=293\div 333$ К и $n=9\div 30\%$ выражается формулой [80]

$$a \cdot 10^8 = \frac{a_w W + a_{св} (100 - W)}{100} \quad (\text{II-102})$$

где a_w — коэффициент температуропроводности воды при температуре обезжиренного молока, $\text{м}^2/\text{с}$;

$a_{св}$ — расчетный коэффициент температуропроводности сухих веществ обезжиренного молока, равный $11,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Значения коэффициента температуропроводности обезжиренного молока, полученные экспериментально [387, 348, 386] и вычисленные по формуле (II-102), различаются незначительно.

Цельное молоко. Удельная теплоемкость молока с ростом температуры от 278 К [386] или от $303\div 313$ К [134, 321] увеличивается.

Экспериментальные данные по $c=f(T)$ и вычисленные по эмпирическим формулам [134, 321, 326] различаются между собой менее чем на 6,5% (табл. II-156). Это различие вызвано в основном неодинаковым содержанием жира в исследуемых образцах.

Таблица II-156

Удельная теплоемкость цельного молока с [в Дж/(кг·К)]

Ж, %	Температура T, К									Источ- ник
	283	288	293	298	303	313	323	333	343	
2,91	3978	—	4020	—	3957	3942	3946	3951	3955	[321]
4,2	3764	—	3778	—	3797	3822	3853	3889	3931	[326]
3,2	3886	3886	3936	3914	3936	3957	3969	3978	3990	[260]
3,96	3914	4011	3978	3927	3927	3936	3902	—	—	[379]
4,3	—	3927	—	—	—	3894	—	3844	—	[260]
4,0	3857	—	3875	—	3893	3911	3929	3947	3965	[134]

Для определения удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] молока рекомендуются следующие формулы:

при $278 < T < 303$ К и Ж=4,2% [386]

$$c = 3756 + 0,54 (T - 273) + 0,028 (T - 273)^2; \quad (\text{II-103})$$

при $278 < T < 303$ К и Ж=2,5% [386]

$$c = 3831 - 2,68 (T - 273) + 0,06 (T - 273)^2; \quad (\text{II-104})$$

при $303 < T < 353$ К и различном содержании жира [134]

$$c = 3932 + 1,51 (T - 273) - [22,78 - 0,0624 (T - 273)] Ж. \quad (\text{II-105})$$

Зависимость удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] молока от температуры и содержания сухих веществ представляется формулой [321]

$$c = 41,87W + [13,73 + 0,113 (T - 273)] п. \quad (\text{II-106})$$

Формула (II-106) справедлива при условии:

$$10 < \frac{Ж}{ОСВ} < 40\%;$$

$8 < п < 40\%$ и $313 < T < 353$ К.

Таблица II-157

Удельная теплоемкость молока (Ж=3,2%) с [в Дж/(кг·К)] [208]

T, К]	Давление $p \cdot 10^{-6}$, Па				
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
303	4300	4500	—	4200	4400
323	4600	4400	4200	4100	4300
343	—	—	4150	4050	4200

Между плотностью (градусы ареометра) разбавленного молока ρ_p и долей добавленной в него воды D установлена зависимость [98]

$$\rho_p = \frac{65,23 - D}{2,33}. \quad (II-107)$$

Формула (II-107) справедлива при $D=0 \div 21\%$.

Обработка экспериментальных данных [98] позволяет установить следующую зависимость между D и температурой замерзания молока T_p (в К):

$$D = 99,9 + 181,8(T_p - 273). \quad (II-108)$$

Между ρ_p (в кг/м^3) и T_p (в К) в соответствии с формулами (II-107) и (II-108) справедлива зависимость

$$\rho_p = 78(272,8 - T_p). \quad (II-109)$$

Температуру (в К), при которой разбавленное молоко имеет максимальную плотность, можно определить по формуле [443]

$$T = \frac{D - 56,52}{10,87} + 273. \quad (II-110)$$

Плотность цельного молока не зависит от месяца дойки коров. Так, средняя плотность молока, поступившего на Тбилисский молочный комбинат, составила $1026,4 \text{ кг/м}^3$ с максимальным отклонением $+0,4\%$ (в мае) и $-0,8\%$ (в сентябре) [260].

При длительном хранении молока плотность его изменяется. Установлено [430], что после 10-недельного хранения козьего молока она уменьшилась с 1032 до 1030 кг/м^3 , а в результате 20-недельного хранения увеличилась до 1033 кг/м^3 . Указанная закономерность вызвана изменением содержания сухих веществ и газов в молоке в процессе хранения.

Газы, находящиеся в молоке, оказывают заметное влияние на плотность. Экспериментально установлено [382], что плотность только что надоенного молока (содержание газов $7,12\%$) равна $1031,1 \text{ кг/м}^3$, а через 2 ч содержание газов уменьшилось до $5,83\%$, поэтому плотность увеличилась до $1031,8 \text{ кг/м}^3$.

С уменьшением давления на молоко и сокращением продолжительности его воздействия уменьшается содержание газов в молоке, а поэтому увеличивается плотность (табл. II-158).

Т а б л и ц а II-158

Плотность молока [382]

Показатель	Исходный	При $p=46-666 \text{ Па}$ в течение, мин		
		0,5	1,0	2,0
Общее содержание газов, %	7,34	7,12	6,59	6,03
Плотность молока, кг/м^3	1028,6	1029,5	1030,2	1030,7

Показатель	Исходный	При $p=13-330$ Па в течение, мин		
		0,5	1,0	2,0
Общее содержание газов, %	6,70	5,42	4,43	3,62
Плотность молока, кг/м ³	1029,8	1030,7	1031,5	1032,2

Стерилизация, пастеризация и гомогенизация не оказывают влияния на плотность молока (опыты проводились с цельным, нормализованным и сепарированным молоком) [408].

В работе [405] также установлено, что гомогенизация молока не оказывает заметного влияния на его плотность (опыты проводились при $p \cdot 10^{-5} = 34,5 \div 207$ Па). Однако если давление менее $20,7 \cdot 10^5$ Па, плотность молока при гомогенизации заметно увеличивается.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что с увеличением содержания жира в молоке его плотность уменьшается [342, 408, 114].

Таблица II-159

Формулы для определения плотности молока [408]

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$
293	$\rho = 1033 - 1,06 \cdot Ж$	333	$\rho = 1018 - 1,06 \cdot Ж$
303	$\rho = 1030 - 1,20 \cdot Ж$	343	$\rho = 1013 - 1,79 \cdot Ж$
313	$\rho = 1027 - 1,32 \cdot Ж$	353	$\rho = 1007 - 2,10 \cdot Ж$
323	$\rho = 1023 - 1,43 \cdot Ж$		

Значения плотности молока ($Ж < 8\%$), вычисленные по формулам (табл. II-159) и приведенные в литературе [342, 117], различаются менее чем на 1%.

С повышением содержания в молоке обезжиренных сухих веществ (ОСВ) его плотность (в кг/м³) увеличивается:

при $8,2 < ОСВ < 10,2\%$ и $T = 283 K$ [439]

$$\rho = 1005 + 3,14 \cdot ОСВ. \quad (II-111)$$

Значения плотности молока, вычисленные по формуле (II-111), и экспериментальные [409] различаются не более чем на 0,1%.

Из формулы (II-111) и приведенных в табл. II-159 видно, что содержание обезжиренных сухих веществ более существенно влияет на плотность молока, чем содержание жира. Определяется это тем, что плотность обезжиренных сухих веществ (1600 кг/м³ [128]) больше отличается от этого показателя воды, чем плотность жира ($\rho = 930 \text{ кг/м}^3$ при $T = 288 K$ [114]).

С повышением содержания в молоке сухих веществ его плотность (в кг/м³) увеличивается [439].

$$\rho = 1019 + 1,05n. \quad (\text{II-112})$$

Формула (II-112) справедлива при $T=283 \text{ K}$ и $n=11,3 \div 16\%$.

В интервалах $T=273 \div 300 \text{ K}$ и $n=0 \div 100\%$ плотность (в кг/м³) молока рекомендовано определять по формуле [378].

$$\rho = 996 + 3,24n. \quad (\text{II-113})$$

При повышении температуры молока его плотность (в кг/м³) уменьшается, а именно:

при $274 < T < 283 \text{ K}$ [439]

$$\rho = 1087 - 0,19T; \quad (\text{II-114})$$

при $283 < T < 343 \text{ K}$

$$\rho = 1166 - 0,45T - 0,77Ж - 0,0146(T - 273)Ж. \quad (\text{II-115})$$

Формула (II-115) получена обработкой экспериментальных данных по $\rho=f(T)$ молока ($Ж < 10\%$), которые приведены в литературе [405, 409, 387, 114, 260, 230, 439, 408].

Плотность молока (в кг/м³) в зависимости от температуры ($T=274 \div 283 \text{ K}$) и содержания сухих веществ ($n=11,5 \div 16\%$) или обезжиренных сухих веществ ($ОСВ=8,2 \div 10,2\%$) выражается следующими формулами [439]:

$$\rho = 1072,3 - 0,188T + 1,05n; \quad (\text{II-116})$$

$$\rho = 1055,7 - 0,179T + 3,14 \text{ ОСВ}. \quad (\text{II-117})$$

Т а б л и ц а II-160

Формулы для определения плотности молока ρ (в кг/м³) при $T=293 \div 303 \text{ K}$ [409]

ОСВ, %	Жищность	
	Ж-3%	Ж-4%
8,6	$\rho = 1111 - 0,280 T$	$\rho = 1115 - 0,295 T$
8,7	$\rho = 1114 - 0,290 T$	$\rho = 1117 - 0,300 T$
8,8	$\rho = 1116 - 0,295 T$	$\rho = 1120 - 0,310 T$
8,9	$\rho = 1118 - 0,300 T$	$\rho = 1123 - 0,320 T$
9,0	$\rho = 1120 - 0,305 T$	$\rho = 1126 - 0,330 T$
9,1	$\rho = 1122 - 0,315 T$	$\rho = 1128 - 0,335 T$

Экспериментальные данные по коэффициенту теплопроводности молока свидетельствуют, что в интервале $Ж=1,6 \div 4,0\%$ он практически не зависит от содержания жира и что его значения, полученные в разных работах, различаются между собой не более чем на 7,9% (табл. II-161).

Коэффициент теплопроводности молока λ [в Вт/(м·К)]

Ж, %	л, %	Температура T , К		Источник
		293	353	
1,6	9,4	0,557	0,643	[322]
2,5	—	0,548	0,620	[348]
2,5	—	0,554	0,618	[230]
2,9	10,9	0,561	0,620	[322]
3,6	—	0,549	0,612	[230]
4,0	—	0,520	0,612	[348]
4,0	—	0,590	—	[259]

Совместная обработка данных по $\lambda=f(T \text{ и } Ж)$ молока ($Ж=1,6-4,0\%$) [322, 348, 230, 376, 259, 260] позволяет рекомендовать формулу

$$\lambda = 0,19 + 0,0012T, \quad (\text{II-118})$$

где λ выражена в Вт/(кг·К).

Следует заметить, что значения коэффициента теплопроводности молока, которые приведены в [260], меньше их действительных значений.

Уравнение для определения коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] молока в соответствии с универсальной формулой (1) во введении имеет вид

$$\lambda = 0,00061 \frac{\rho}{\alpha}. \quad (\text{II-119})$$

Необходимые значения $\rho=f(T)$ в уравнении (II-119) следует вычислить по формулам, приведенным выше. Значения $\alpha=f(T)$ даны во введении.

Использование формул (II-105, II-114 и II-118) позволило рассчитать коэффициент температуропроводности молока при разных температурах (табл. II-162).

Таблица II-162

Коэффициент температуропроводности молока $a \cdot 10^8$ (в м²/с)

Ж, %	Температура T , К				
	273	293	313	333	353
1,6	12,6	13,4	14,0	14,6	15,1
4,0	12,8	13,5	14,2	14,8	15,3

Увеличение коэффициента температуропроводности молока при повышении температуры связано с тем, что коэффициент теплопроводности при этом увеличивается, а объемная теплоемкость молока уменьшается.

МОЛОЧНЫЕ ПРОДУКТЫ

Сгущенное молоко. Удельная теплоемкость сгущенного молока из обезжиренного молока (ОМ), полужирного молока (ПМ) и цельного молока (ЦМ) с повышением температуры увеличивается (табл. II-163).

Таблица II-163

Формулы для определения удельной теплоемкости сгущенного молока [321, 386]

Вид молока	T, К	Ж, %	л, %	c, Дж/(кг·К)
ОМ	313—343	0,26	16,24	$c = 3806 + 1,19 (T - 273)$
	273—353	—	20,0	$c = 3756 + 3,73 (T - 273) - 0,0054 (T - 273)^2$
	313—343	0,43	27,16	$c = 3466 + 2,55 (T - 273)$
	273—353	—	30	$c = 3278 + 16,4 (T - 273) - 0,13 (T - 273)^2$
	273—353	—	40	$c = 2964 + 12,3 (T - 273) - 0,02 (T - 273)^2$
ПМ	313—343	2,89	17,63	$c = 3697,1 + 1,83 (T - 273)$
	313—343	4,77	29,07	$c = 3433,3 + 2,47 (T - 273)$
ЦМ	313—343	6,07	21,72	$c = 3605,0 + 2,19 (T - 273)$
	273—347	7,0	25,0	$c = 3558,9 - 0,62 (T - 273) + 0,176 (T - 273)^2$
	313—343	7,25	27,70	$c = 3424 + 2,83 (T - 273)$
	313—343	10,84	39,89	$c = 3136 + 3,26 (T - 273)$

Таблица II-164

Формулы для определения удельной теплоемкости сгущенного молока [321]

T, К	Вид молока	л, %	c, Дж/(кг·К)
313	ОМ	16,24—27,16	$c = 4229 - 24,2 л$
	ПМ	17,63—29,07	$c = 4212 - 23,8 л$
	ЦМ	21,72—39,89	$c = 4195 - 23,3 л$
323	ОМ	16,24—27,16	$c = 4220 - 22,9 л$
	ПМ	17,63—29,07	$c = 4195 - 22,3 л$
	ЦМ	21,72—39,89	$c = 4179 - 21,9 л$
333	ОМ	16,24—27,16	$c = 4229 - 22,5 л$
	ПМ	17,63—29,07	$c = 4195 - 21,4 л$
	ЦМ	21,72—39,89	$c = 4187 - 21,1 л$
343	ОМ	16,24—27,16	$c = 4216 - 20,9 л$
	ЦМ	17,63—29,07	$c = 4204 - 20,6 л$
	ЦМ	21,72—39,89	$c = 4179 - 19,8 л$

Плотность (в кг/м³) сгущенного молока из ОМ при одновременном изменении двух определяющих факторов ($ОСВ=7,3 \div 37,9\%$ и $T=283-358\text{ К}$) равна [124]:

$$\rho = 1122 + 3,71 ОСВ - 0,437. \quad (II-120)$$

Значения плотности сгущенного молока из ОМ, вычисленные по формуле (II-120) и по приведенным в табл. II-165, различаются менее чем на 2%.

Таблица II-165

формулы для определения плотности сгущенного молока ($ОСВ=10 \div 45\%$, $n=22,28\%$) [387]

Вид молока	T, К	ρ , кг/м³
ОМ	278	$\rho = 1000 + 3,62 ОСВ + 0,0183 ОСВ^2$
	293	$\rho = 998 + 3,352 ОСВ + 0,0178 ОСВ^2$
	308	$\rho = 994 + 3,50 ОСВ + 0,0166 ОСВ^2$
	323	$\rho = 988 + 3,57 ОСВ + 0,0137 ОСВ^2$
	338	$\rho = 981 + 3,60 ОСВ + 0,0131 ОСВ^2$
ЦМ	278	$\rho = 1000 + 2,55 n$
	293	$\rho = 1008 + 2,09 n$
	308	$\rho = 1014 + 1,66 n$
	323	$\rho = 995 + 2,11 n$

Таблица II-166

Плотность сгущенного молока с сахаром [124]

Продукт	T, К	ρ , кг/м³
Пастеризованное молоко	293	1029—1031
Молоко из вакуум-аппарата	293	1060—1110
	313—333	1060—1090
Молоко после всасывания сахарного сиропа	293	1260—1290
	313—333	1240—1270
Готовое сгущенное молоко с сахаром	293	1290—1310

Таблица II-167

Коэффициент теплопроводности сгущенного молока при $T=313\text{ К}$ [322, 348]

ОСВ, %	Ж, %	λ , Вт/(м·К)	ОСВ, %	Ж, %	λ , Вт/(м·К)
16,2	0,23	0,590	27,1	0,42	0,567
16,7	2,80	0,557	27,6	4,7	0,520
			27,0	7,6	0,509

С увеличением содержания ОСВ, например при $\mathcal{K}=10\%$ и $T=313$ К, коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] сгущенного молока уменьшается.

$$\lambda = 0,636 - 0,00437 \text{ ОСВ.} \quad (\text{II-121})$$

Формула (II-121) получена совместной обработкой данных [260, 322] и справедлива при $\text{ОСВ}=10\div 40\%$.

Формулы, выражающие зависимость $\lambda=f(T)$ для сгущенного молока в интервале 283—348 К [322], 295—323 К [260], 291—326 К [348], приведены в табл. II-168.

Таблица II-168

Формулы для определения коэффициента теплопроводности сгущенного молока

Вид молока	$\mathcal{K}, \%$	ОСВ, %	λ , Вт/(м·К)	Источ-ник
ОМ	0,23	16,2	$\lambda = 0,055 + 0,0021 T - 73 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	—	20,0	$\lambda = 0,088 + 0,0015 T$	[348]
	0,42	27,1	$\lambda = 0,048 + 0,0020 T - 71 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	—	30,0	$\lambda = 0,089 + 0,0014 T$	[348]
	—	40,0	$\lambda = 0,100 + 0,0013 T$	[348]
ПМ	2,8	16,7	$\lambda = -0,052 + 0,0020 T - 53 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	4,7	27,6	$\lambda = 0,144 + 0,0012 T - 11 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
ЦМ	10	10	$\lambda = 0,248 + 0,0011 T$	[260]
	10	20	$\lambda = 0,214 + 0,0011 T$	[260]
	5,9	21,6	$\lambda = -0,092 + 0,0021 T - 102 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	7,6	27	$\lambda = 0,303 + 0,00066 T$	[348]
	7,3	28,7	$\lambda = 0,0495 + 0,0015 T - 67 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	10	33	$\lambda = 0,117 + 0,0012 T$	[260]
	11,2	40	$\lambda = 0,159 + 0,00097 T - 11 \cdot 10^{-7} (T-273)^2$	[322]
	10	50	$\lambda = 0,094 + 0,00077 T$	[260]

Уравнение для определения коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] обезжиренного сгущенного молока в соответствии с универсальной формулой (см. введение) имеет вид

$$\lambda = \frac{0,694 - 0,0053 \cdot \text{ОСВ}}{1000\alpha} \rho. \quad (\text{II-122})$$

Необходимые значения $\rho=f(T)$ в уравнении (II-122) следует вычислить по формулам, приведенным выше. Значения $\alpha=f(T)$ даны во введении.

Приведенные данные по ρ и λ сгущенного молока из ОМ (табл. II-163, II-165, II-168) позволили рассчитать его коэффициент температуропроводности (табл. II-169).

Приведенные в табл. II-169 значения коэффициента температуропроводности сгущенного молока и рассчитанные по универсальной формуле [см. формулу (7) во введении] различаются при $\text{ОСВ}=16\div 30\%$ от 5 до 10%.

Таблица 11-169

Коэффициент температуропроводности сгущенного
молока $\alpha \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$)

ОСВ, %	Температура T , К			
	283	303	323	343
16	13,3	14,2	15,0	15,7
20	12,5	13,1	13,7	14,3
30	12,5	12,5	12,9	13,6

Сливки. В учебной [128] и справочной [260] литературе приводится удельная теплоемкость сливок, которая была определена в 1913 г. Более поздние работы других исследователей [131, 386, 4] показали, что в действительности значения удельной теплоемкости сливок отличаются от приведенных в [128, 260] на 10—20%.

Удельную теплоемкость [в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$] сливок в интервалах $X=30 \div 83\%$ и $T=313 \div 363$ К рекомендуется определять по формуле [4]

$$c = 3906 + 1,382(T - 273) - [23,86 - 0,0712(T - 273)] X. \quad (\text{II-123})$$

Значения удельной теплоемкости сливок, вычисленные по формуле (II-123) и приведенные в [386], различаются не более чем на 6—10%.

Таблица 11-170

Удельная теплоемкость сливок c [в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$] в интервале температур 2 К

T , К	Жирность X , %									
	10,5	19,9	28,7	26,8	28,0	30,4	35,0	35,7	39,0	47,0
276—278	1725	1888	2043	1792	1851	2470	—	—	—	—
292—294	3383	3299	3504	3366	3199	3324	4128	3655	3090	3354
302—304	3601	3249	3613	3458	3873	3718	3421	3613	3140	3546
312—314	3437	3509	3848	3343	3609	3550	3174	3232	3048	2814
322—324	3655	3835	3936	3274	—	3504	3308	3483	3308	3295
332—334	3844	4002	4254	3810	3651	3718	3814	—	3488	3692
342—344	4371	4325	4417	4162	—	3940	3957	—	3680	3726
352—354	4434	—	—	—	—	4564	4530	—	—	3844
362—364	—	4505	—	4199	—	4869	—	—	—	3822

Удельная теплоемкость сливок [в Дж/(кг·К)] в интервале температур 5 К [389]

Т, К	Жириность Ж, %					
	10	20	30	40	50	60
273—278	3923	3902	3881	3856	3835	3814
278—283	3948	3952	3957	3957	3961	3965
283—288	4149	4354	4560	4565	4966	5171
288—293	4325	4706	5087	5464	5845	6226
293—298	3789	3638	3483	3484	3174	3023
298—303	3747	3554	3358	3161	2964	2772
303—308	3747	3554	3358	3161	2964	2772

Таблица II-172

Теплофизические характеристики пастеризованных сливок * [128]

Т, К	Ж, %	с, Дж/(кг·К)	λ, Вт/(м·К)	α·10 ⁶ , м ² /с
273—275	20	4145	0,336	8,0
	35	4271	0,313	7,3
	45	4396	0,302	6,9
281—283	20	3873	0,348	8,9
	35	4103	0,325	8,6
	45	4020	0,302	7,6
288—290	20	3768	0,360	9,6
	35	3726	0,348	6,4
	45	3664	0,313	9,9
293—295	20	3643	0,383	10,6
	35	3517	9,360	10,3
	45	3391	0,325	9,7

* По данным А. И. Карачаевой.

Некоторыми авторами [117,3] рекомендуется удельную теплоемкость сливок [в Дж/(кг·К)] рассчитывать по формуле аддитивности

$$c = \frac{c_{ж}Ж + c_{н}(100 - Ж)}{100}, \quad (\text{II-124})$$

Необходимые значения удельной теплоемкости жира ($c_{ж}$) и плазмы ($c_{п}$) рекомендуется определять по формулам II-137 и II-98.

Таблица II-173

Удельная теплоемкость сливок c [в Дж/(кг·К)] при малых давлениях ($J=31-33,5\%$) [208]

Т, К	Давление p , МПа				
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
303	4050	4200	4200	4400	4150
323	3500	3420	3450	3700	3500
343	—	3420	3420	3500	3500

Совместный анализ экспериментальных данных по $\rho=f(J)$ в интервалах $J=20\div 50\%$ [440], $30\div 83\%$ [3], $25\div 45\%$ [256], $10\div 40\%$ [137], $20\div 40\%$ [342] свидетельствует, что при одинаковых значениях J и T они различаются максимально на 1,5%. Для расчета $\rho=f(J)$ сливок рекомендуемые формулы приведены в табл. II-174.

Таблица II-174

Формулы для определения плотности сливок [3, 342]

Т, К	Ж, %	ρ , кг/м ³	Т, К	Ж, %	ρ , кг/м ³
274	30—83	$\rho=1047-1,17 J$	303	20—40	$\rho=1032-1,25 J$
283	30—83	$\rho=1046-1,22 J$	313	30—83	$\rho=1021-1,18 J$
288	30—83	$\rho=1041-1,19 J$	323	20—40	$\rho=1024-1,30 J$
293	30—83	$\rho=1035-1,15 J$			

Значения плотности сливок, вычисленные по рекомендуемым формулам (табл. II-175) и приведенным в литературе ($J=30$ и 48% [387], $J=20, 30$ и 40% [342], $J=25, 30, 35$ и 45% [256]), различаются незначительно.

Таблица II-175

Формулы для определения плотности сливок при $T=273\div 368$ К [3]

Ж, %	ρ , кг/м ³	Ж, %	ρ , кг/м ³
28,6	$\rho=1155-0,51 T$	55,0	$\rho=1183-0,73 T$
35,0	$\rho=1185-0,64 T$	60,4	$\rho=1164-0,69 T$
40,5	$\rho=1199-0,72 T$	65,1	$\rho=1149-0,66 T$
45,0	$\rho=1199-0,74 T$	74,8	$\rho=1164-0,73 T$
50,3	$\rho=1155-0,77 T$	83,2	$\rho=1163-0,75 T$

Формулы для расчета $\rho=f(\text{OCB})$ при $\text{OCB}=4,7\div5,9\%$ [440], $\rho=f(n)$ при $n=25\div50\%$ [440] и $\rho=f(W)$ [3] для сливок приведены в табл. II-176.

Таблица II-176

Формулы для определения плотности сливок в зависимости от химического состава

T, K	$\rho=f(n), \text{ кг/м}^3$	$\rho=f(\text{OCB}), \text{ кг/м}^3$	$\rho=f(W), \text{ кг/м}^3$
274	$\rho=1039-0,69 n$	$\rho=983,3+5,29 \text{ OCB}$	—
283	$\rho=1039-0,85 n$	$\rho=970,4+4,37 \text{ OCB}$	$\rho=924+1,33 W$
288	—	$\rho=918,8+13,1 \text{ OCB}$	$\rho=922+1,30 W$
293	—	$\rho=916,0+12,7 \text{ OCB}$	$\rho=900+1,26 W$

В работе [440] предложена формула, выражающая зависимость плотности сливок (в кг/м^3) от двух определяющих факторов ($20 < Ж < 50\%$ и $4,7 < \text{OCB} < 5,9\%$).

При $T=274 K$

$$\rho = 1018,5 - 0,45Ж + 1,67 \text{ OCB}; \quad (\text{II-125})$$

при $T=283 K$

$$\rho = 1019,3 - 0,63Ж + 1,34 \text{ OCB}. \quad (\text{II-126})$$

Экспериментальные данные по плотности (в кг/м^3) сливок ($Ж=30-83\%$) в интервале $273\div368 K$ позволили рекомендовать формулу [3]

$$\rho = 1222 - 1,17Ж - 0,638T. \quad (\text{II-127})$$

Этот же автор на основании обработки результатов собственных исследований и литературных данных предложил формулу, которая справедлива для плотности (в кг/м^3) сливок при $Ж=30\div83\%$ и $T=313\div363 K$ [3]:

$$\rho = 1043,5 - 1,17Ж - (0,520 + 1,6 \cdot 10^{-3}Ж) \cdot (T - 273). \quad (\text{II-128})$$

Значения плотности сливок, вычисленные по формулам (II-127) и (II-128), различаются менее чем на $0,5\%$.

Некоторыми авторами [3, 17] предложено плотность сливок (в кг/м^3) рассчитывать по формуле аддитивности

$$\rho = \frac{\rho_{ж}Ж + \rho_{п}(100 - Ж)}{100}. \quad (\text{II-129})$$

Необходимые значения плотности жира ($\rho_{ж}$) и плазмы ($\rho_{п}$) в интервале $T=273\div363 K$ рекомендуется определять по формулам (II-146) и (II-100).

Значения коэффициента теплопроводности пастеризованных сливок приведены в табл. II-172.

Уравнение для определения коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] сливок ($J=10-60\%$ и $T=303\div 353$ К) в соответствии с универсальной формулой [см. формулу (1) во введении] имеет вид

$$\lambda = \frac{0,613 - 0,0056J}{\alpha} \cdot \frac{\rho^{0,5}}{1000} \quad (\text{II-130})$$

Необходимые значения $\rho=f(T)$ в уравнении (II-130) следует вычислить по формулам, приведенным выше. Значения $\alpha=f(T)$ даны во введении.

Принципиальное отличие формулы (II-130) от аналогичной, приведенной в [78], связано с методом расчета постоянной B .

Значения коэффициента теплопроводности сливок, приведенные в различных работах [131, 323, 260, 348] и рассчитанные по уравнению (II-130), различаются незначительно.

Т а б л и ц а II-177

Формулы для определения коэффициента теплопроводности сливок при $T=303\div 353$ К [131]

Ж, %	λ , Вт/(м·К)	Ж, %	λ , Вт/(м·К)
10	$\lambda = -0,030 + 0,0017 T$	45	$\lambda = -0,134 + 0,0014 T$
20	$\lambda = -0,058 + 0,0016 T$	60	$\lambda = -0,181 + 0,0013 T$
35	$\lambda = -0,008 + 0,0015 T$	80	$\lambda = -0,111 + 0,0010 T$

Значения коэффициента температуропроводности пастеризованных сливок приведены в табл. II-172.

С увеличением содержания в сливках жира от 3,2 до 96% их коэффициент температуропроводности (в м²/с) при $T=303$ К уменьшается [133].

$$\alpha \cdot 10^8 = 13,64 - 0,051J. \quad (\text{II-131})$$

Т а б л и ц а II-178

Формулы для определения коэффициента температуропроводности сливок при $T=303\div 353$ К [131]

Ж, %	α , м ² /с	Ж, %	α , м ² /с
10	$\alpha \cdot 10^8 = 3,5 + 0,032 T$	45	$\alpha \cdot 10^8 = 3,5 + 0,026 T$
20	$\alpha \cdot 10^8 = 3,0 + 0,032 T$	60	$\alpha \cdot 10^8 = 3,3 + 0,024 T$
35	$\alpha \cdot 10^8 = 2,2 + 0,032 T$	80	$\alpha \cdot 10^8 = 0,2 + 0,031 T$

Масло. Удельная теплоемкость масла практически от его вида не зависит (табл. II-179).

Теплофизические характеристики масла [162]

Масло	W, %	с [в Дж/(кг·град)] при T, К			λ [в Вт/(м·К)] при T, К		α · 10 ⁶ (в м ² /с) при T, К	
		273— 278	283— 288	288— 293	278	290	278	290
Несоленое, полученное сбиванием	15,9	3094	4421	5129	0,202	0,230	6,7	4,7
Соленое, полученное сбиванием	15,9	3266	3948	5183	0,195	0,206	6,7	4,3
Любительское	19,2	3245	4601	4970	0,162	0,176	5,9	4,4
Поточного производства	16,0	3153	4208	5200	0,195	0,230	6,1	4,3

Значения удельной теплоемкости масла при $T=273\div 293$ К, которые приводятся в литературе, различаются между собой незначительно (табл. II-180).

Таблица II-180

Удельная теплоемкость масла с [в Дж/(кг·К)]
[230, 162]

Температура T, К			
273—278	278—283	283—288	288—293
2973	3643	4145	5620
3182	3685	4190	5127
3100	—	4400	5100

В интервале 313—363 К формула для определения удельной теплоемкости масла [в Дж/(кг·К)] имеет вид [4]

$$c = 64 + 7,29T. \quad (\text{II-132})$$

Некоторые авторы [3, 117] рекомендуют определять удельную теплоемкость сливок разной жирности и масла [в Дж/(кг·К)] по формуле аддитивности.

Для масла ($W=17\%$) эти формулы имеют следующий вид: в интервале 313—363 К [3]

$$c = 1941 + 7,61(T - 273); \quad (\text{II-133})$$

в интервале 303—353 К [117]

$$c = 2041 + 6,64(T - 273). \quad (\text{II-134})$$

Значения удельной теплоемкости масла, вычисленные по формуле (II-133 и II-134) и экспериментальные [260], различаются между собой, например при $T=313$ и 333 К, максимально на 4%.

Т а б л и ц а II-181

Формулы для определения плотности масла [260, 3]

Масло	T , К	ρ , кг/м ³
Фасованное поточного приготовления	273—278	$\rho = 1488 - 2,0 T$
	278—283	$\rho = 2044 - 4,0 T$
	278—283	$\rho = 2072 - 4,0 T$
полученное в масло-изготовителе периодического действия	273—368	$\rho = 1163 - 0,75 T$
	273—363	$\rho = 1141 - 0,70 T$
Способ производства не указан		

Т а б л и ц а II-182

Формулы для определения плотности масла, содержащего воздух

Содержание воздуха (B), %	ρ , кг/м ³	Источник
0—5	$\rho = 945 - 10,0 B$	[31]
0—10	$\rho = 950 - 9,5 B$	[233]

Плотность соленого масла ($T=275\div 280$ К) больше, чем несоленого (соответственно 942 и 938 кг/м³) [260].

В результате трехлетнего хранения масла его плотность увеличилась с 935 до 952 кг/м³, так как в нем уменьшилось содержание воздуха [260].

Т а б л и ц а II-183

Плотность масла ($W=16\%$) при $T=288$ К [215]

Масло	Поточного приготовления		Традиционного приготовления	
	содержание воздуха, см ³ /г	ρ , кг/м ³	содержание воздуха, см ³ /г	ρ , кг/м ³
Необработанное	0,093—0,097	869—880	0,030—0,047	937—903
Гомогенизированное	0,063—0,079	896—891	0,089—0,000	954—937
Фасованное	0,125—0,064	888—886	0,000—0,076	921—926

Экспериментальные значения плотности масла (табл. II-182 и II-183) свидетельствуют, что определять плотность масла по формуле аддитивности можно только в том случае, когда в нем не содержится воздуха.

Совместная обработка экспериментальных данных по коэффициенту теплопроводности масла [в Вт/(м·К)] в интервале 278—292 К [311, 162, 209, 128] позволила рекомендовать формулу [230]

$$\lambda = -0,59 + 0,0025T. \quad (\text{II-135})$$

О влиянии температуры на коэффициент температуропроводности масла в литературе встречаются противоположные сведения. Так, например, при повышении температуры масла от 273 до 293 К его коэффициент температуропроводности по данным [162] уменьшается, по [279] — не меняется, а по [273—128] — увеличивается.

Приведенные значения ρ , λ и α масла (см. табл. II-180 и II-181) и формула (II-135) позволили подсчитать его коэффициент температуропроводности.

Температура, К	275	280	285	290
Коэффициент температуропроводности $\alpha \cdot 10^4$, м/с	6,6	5,8	5,2	4,5

Вычисленные значения коэффициента температуропроводности масла и приведенные [162] различаются незначительно.

Молочный жир. Зависимость $c=f(T)$ для молочного жира определяется его состоянием. В зоне твердого состояния ($T < 233$ К) удельная теплоемкость жира практически постоянна и составляет, по данным разных источников [170, 101, 447, 162], от 1046 до 1758 Дж/(кг·К). При плавлении жира удельная теплоемкость резко возрастает, достигая максимума, а на кривой $c=f(T)$ наблюдаются и менее выраженные пики, соответствующие плавлению различных групп триглицеридов (табл. II-184).

Таблица II-184

Удельная теплоемкость молочного жира c [в Дж/(кг·К)]

Температура T , К			Источник	Температура T , К			Источник
288	290,5	303—308		288	290,5	303—308	
6000	—	3700	[170]	—	5778	—	[162]
5800	—	3800	[240]	—	7745	—	[389]
—	6700	—	[101]	—	7118	3862	[230]

В интервале 273—293 К удельную теплоемкость [в Дж/(кг·К)] молочного жира рекомендовано определять по формуле [230]

$$c = 2512 + 134(T - 273). \quad (\text{II-136})$$

При сопоставлении экспериментальных значений удельной теплоемкости молочного жира и вычисленных по формуле (II-136) видно, что они различаются до 40% (табл. II-185).

Удельная теплоемкость молочного жира с [в Дж/(кг·К)]

Температура T , К								Источник
273	274	275,5	278	280,5	285,5	290,0	290,5	
2512	2646	2847	3182	3517	4187	4790	4857	По формуле (II-136)
3488	3697	—	—	—	—	—	—	[230]
—	—	3065	—	—	5409	5716	5761	[162]
4500	—	—	—	—	—	—	6700	[230]
—	—	—	—	—	—	—	5778	[162]
—	—	3726	—	3978	5990	—	7700	[389]

Совместная обработка данных, приведенных в табл. II-185, позволяет рекомендовать формулу для расчета удельной теплоемкости молочного жира [в Дж/(кг·К)]

$$c = 3567 + 109,6 (T - 273). \quad (\text{II-137})$$

Формулы (табл. II-186) имеют только внешнее различие, так как удельная теплоемкость молочного жира, вычисленная с их помощью, и экспериментальные ее значения [304, 389, 260, 447] различаются не более чем на 10% при $T = -313$ К и на 0,9% при $T = -343$ К.

В результате обработки экспериментальных данных разных авторов по удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] молочного жира в интервале $303 \div 347$ К предложена формула [117]

$$c = -460 + 7,74T. \quad (\text{II-138})$$

Обработка экспериментальных данных по c и ρ жира в интервале $293-303$ К позволяет рекомендовать формулу для определения его объемной теплоемкости [в Дж/(м³·К)]

$$c_V = -35,8 + 6,9T - 0,0038T^2. \quad (\text{II-139})$$

Плотность молочного жира с повышением температуры уменьшается и определяется рядом факторов.

Плотность жира коровьего молока в интервале $293-273$ К больше, если он охлаждался быстро, а не ступенчато. При более высокой температуре ($313-293$ К) на плотность указанные режимы охлаждения оказывают примерно одинаковое влияние (табл. II-187).

Таблица II 186

Формулы для определения удельной теплоемкости молочного жира при $T > 313$ К

T , К	Дж/(кг·К)	Источник
303—347	$c = -859 + 8,79 T$	[230]
303—363	$c = -319 + 7,27 T$	[240]
310—365	$c = 156 + 5,88 T$	[170]
313—350	$c = 723 + 4,20 T$	[101]

Плотность молочного жира ρ (в кг/м^3) [5]

Охлаждение	Температура T , К								
	273	278	283	285	288	293	298	303	313
Быстрое	961,8	955,0	946,4	944,4	940,2	929,9	921,9	914,4	903,6
Ступенчатое	955,2	950,5	941,9	—	934,3	926,9	921,1	914,3	903,6

Зависимость ρ (в кг/м^3) жира коровьего молока от температуры ($T=293\div 303$ К) определяется его характеристикой [367]:

$$\text{для тугоплавкого } \rho = 1341 - 1,4T; \quad (\text{II-140})$$

$$\text{для нормального } \rho = 1279 - 1,2T; \quad (\text{II-141})$$

$$\text{для жидкого } \rho = 1095 - 0,6T. \quad (\text{II-142})$$

Таблица II-188

Плотность молочного жира производства разных стран

Страна	T , К	ρ , кг/м^3	Источник
СССР	293	904,6	[6]
США	333	886,7—894,0	[366]
Новая Зеландия	333	888,5—891,6	[366]
Канада	313	907,2	[196]
Индия	333	898	[315]

Сведения о влиянии времени года на плотность молочного жира противоречивы: по данным [196] она больше летом, а по [230, 366] — зимой. В работе [438] установлено, что плотность (в кг/м^3) жира коровьего молока ($T=313\div 333$ К) не зависит от времени года и определяется по формуле

$$\rho = 1121,3 - 0,69T. \quad (\text{II-143})$$

Плотность жира коровьего молока (в кг/м^3) можно определить по формулам:

в интервале 293—303 К [367]

$$\rho = 1319 - 1,34T; \quad (\text{II-144})$$

в интервале 303—343 К

$$\rho = 1126,6 - 0,71T. \quad (\text{II-145})$$

Экспериментальные значения плотности молочного жира при $T=303$ К ($914,4 \text{ кг/м}^3$) [5], вычисленные по формулам (II-144, II-145) и по приведенным в табл. II-189, различаются не более чем на 0,4%.

Таблица II-189

Формулы для определения плотности молочного жира
при $T=288\div 323\text{ К}$ [404, 315]

Жир	Способ отделения влаги	ρ , кг/м ³
Коровьего молока	В вакуумной печи Центрофугирование с последующей сушкой в вакуумной печи	$\rho=1042,6-0,47\text{ }T$ $\rho=1040,9-0,43\text{ }T$
Молока буйволицы	В вакуумной печи Центрофугирование с последующей сушкой в вакуумной печи	$\rho=1092,6-0,61\text{ }T$ $\rho=1043,9-0,44\text{ }T$

В широком интервале температуры ($T=273\div 363\text{ К}$) плотность жира коровьего молока (в кг/м³) рекомендуется определять по формуле [3]

$$\rho = 1125,7 - 0,708T. \quad (\text{II-146})$$

Таблица II-190

Плотность эмульсии молочного жира
при $T=303\text{ К}$ [413]

Эмульсия жира молока буйволицы		Эмульсия жира коровьего молока	
Ж, %	ρ , кг/м ³	Ж, %	ρ , кг/м ³
0,45	730	0,50	728
1,10	782	1,00	820
1,95	847	2,00	837
3,90	888	4,00	888
6,95	905	10,0	913
13,85	907	15,0	918
54,90	911	48,0	922

Таблица II-191

Температурный коэффициент объемного расширения
жира коровьего молока [114, 230]

T , К	303—313	313—323	323—333	333—373
$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	0,78	0,79	0,79	0,80

Температурный коэффициент объемного расширения, вызванного изменением агрегатного состояния жира, равен $18,24 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [6].

Коэффициент теплопроводности жира коровьего молока [Вт/(м·К)] равен [170]:

$$\text{до } T = 288 \text{ K} \quad \lambda = 0,037 + 0,000470T; \quad (\text{II-147})$$

$$\text{при } T = 288 + 363 \text{ K} \quad \lambda = 0,216 - 0,000155T. \quad (\text{II-148})$$

Значения коэффициента теплопроводности жира, вычисленные по формулам (II-147, II-148) и приведенные в [209, 128, 132, 422, 379], различаются незначительно.

Т а б л и ц а II-192

Коэффициент теплопроводности молочного жира [422]

W, %	Содержание воздуха, %	λ , Вт/(м·К)	W, %	Содержание воздуха, %	λ , Вт/(м·К)
0,3	0,1	0,163	16,9	6,5	0,190
14,5	0,1	0,208	15,3	10,0	0,173

Коэффициент температуропроводности жира коровьего молока (в $\text{м}^2/\text{с}$) при $T=288 \text{ K}$ имеет минимальное значение $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. В интервале 310—363 K он равен [170]:

$$a \cdot 10^8 = 10,58 - 0,0351 (T - 273) + 0,000078 (T - 273)^2. \quad (\text{II-149})$$

Значения a жира, вычисленные по формуле (II-149) и приведенные в [162, 273], различаются незначительно.

Сухое молоко. Удельная теплоемкость сухого цельного молока ($T=308 \div 313 \text{ K}$) и сухого обезжиренного молока ($T=291 \div 303 \text{ K}$), полученных распылительной сушкой, соответственно равны 1382—1507 и 1172—1340 Дж/(кг·К) [304].

Т а б л и ц а II-193

Формулы для определения удельной теплоемкости сухого молока [432, 230]

Сухое молоко	Способ сушки	W, %	Ж, %	T, K	$c = f(T)$, Дж/(кг·K)
Цельное	Распылительный	3,0	18	294—358	$1219 + 0,95T$
	Вальцовый	3,5	18	294—358	$1280 + 0,83T$
Обезжиренное	—	2,2	—	253—313	$-3103 + 15,0T$

Таблица II-194

Насыпная плотность цельного сухого молока ρ_n (в кг/м³) [370]

Сухое молоко	Жиристость Ж, %				
	1	2	5	10	26
Цельное	239	186	147	108	100
Обезжиренное	268	237	223	192	136

Таблица II-195

Насыпная плотность сухого молока ρ_n (в кг/м³) [303]

Сухое молоко	Влажность W, %			
	2,5	5,0	10	15
Цельное	1050	1040	1200	1280
Обезжиренное	1115	1113	1113	1200

Плотность цельного сухого молока зависит от его химического состава и главным образом от содержания жира (табл. II-196).

Таблица II-196

Плотность сухого молока и его компонентов при $T = 288 \div 293$ К

Материал	ρ (в кг/м³) по данным		
	Г. А. Кука	Я. С. Зайковского	Г. С. Инихова
Молочный жир	925	930	918—927
Белки молока	1346—1450	1250—1300	1393—1448
Лактоза	1535—1666	1525	1592—1628
Соли молока	3000—4120	2300—2400	2617—3098
Цельное СМ	—	—	1296—1450
Обезжиренное СМ	1601—1636	—	1598—1623

Таблица II-197

Плотность и коэффициент теплопроводности сухого молока

Сухое молоко	Способ сушки	W, %	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	Источ- ник
Цельное	Пеносушка	3,9	—	450	—	[19]
	Распыление	4,2	—	610	—	[19]
Обезжиренное	»	2,4	—	440	0,211	[423]
	»	3,11	1233	609	—	[13]
	»	4,0	—	550	0,258	[423]
	Пенораспыле- ние	3,71	1292	606	—	[13]
	Барабанный	3,5	—	172	0,185	[423]
Быстрорастворимое	—	3,2	1234	332	—	[13]
		4,5	—	304	0,182	[423]
		3,2	—	—	—	—

Таблица II-198

Истинная, физическая и насыпная плотность сухого молока

Сухое молоко	$\rho_{\text{пл}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{ф}}$, кг/м ³	ϵ_c , %	Источник	ρ_n , кг/м ³	Источник
Цельное	1300	1060	18	[303]	450—660	[19]
Обезжиренное	1470	1140	22	[303]	624—652	[327]

Таблица II-199

Формулы для определения коэффициента теплопроводности цельного молока при $T=308\div 338$ К [437]

Сухое молоко	W, %	Ж, %	ρ_n , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
Распылительной сушки	3,0	18	540	$\lambda = -1,95 + 0,0076 T$
			628	$\lambda = -2,35 + 0,0091 T$
			660	$\lambda = -2,02 + 0,0083 T$
Высушенное на вальцах	3,5	18	526	$\lambda = -2,32 + 0,0087 T$
			613	$\lambda = -2,44 + 0,0093 T$
			659	$\lambda = -2,20 + 0,0088 T$

Для обезжиренного сухого молока ($\rho_n = 580 \text{ кг/м}^3$) в интервале $T = 314 \div 339 \text{ К}$ коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] изменяется по следующему закону [374]:

$$\text{при } W = 4,2\% \quad \lambda = -1,65 + 0,00667T; \quad (\text{II-150})$$

$$\text{при } W = 5,8\% \quad \lambda = -0,78 + 0,00417T; \quad (\text{II-151})$$

$$\text{при } W = 6,9\% \quad \lambda = -1,08 + 0,00517T. \quad (\text{II-152})$$

С повышением влажности ($W = 2,4 \div 15\%$) цельного сухого молока ($T = 333 \text{ К}$, $\rho_n = 440 \text{ кг/м}^3$) коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] увеличивается [423]:

$$\lambda = 0,172 + 0,024W. \quad (\text{II-153})$$

Таблица II-200

Формулы для определения коэффициента теплопроводности обезжиренного сухого молока при $T = 333 \text{ К}$ [423, 309]

Сухое молоко	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$W, \%$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$
Распылительной сушки	550	2—12	$\lambda = 0,184 + 0,018 W$
Быстрорастворимое	304	3,2—8	$\lambda = 0,066 + 0,038 W$
	735	0—10	$\lambda = 0,199 + 0,013 W$

Таблица II-201

Коэффициент теплопроводности сухого молока при $T = 333 \text{ К}$ [423]

Сухое молоко	Среда	$W, \%$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$
Цельное	Воздух	2,4	475—600	$\lambda = -0,16 + 0,0008 \rho_n$
	Азот	3,5	155—250	$\lambda = 0,17 + 0,0005 \rho_n$
	Углекислый газ	3,1	365—450	$\lambda = 0,08 + 0,00059 \rho_n$
Обезжиренное	Воздух	3,5	450—700	$\lambda = 0,13 + 0,00024 \rho_n$
	Углекислый газ	3,5	400—600	$\lambda = 0,08 + 0,00025 \rho_n$
	Воздух	3,5	460—600	$\lambda = -0,02 + 0,00057 \rho_n$
	»	3,6	170—250	$\lambda = 0,08 + 0,00062 \rho_n$

Для обезжиренного сухого молока ($T = 333 \text{ К}$, $W = 3,5\%$) в интервале плотности от 500 (насыпная плотность) до 1500 кг/м^3 (плотность монолита) коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] равен [309]:

$$\lambda = 0,026 + 0,000294\rho_n. \quad (\text{II-154})$$

ТФХ монолита обезжиренного сухого молока ($T = 333 \text{ К}$, $W = 3,5\%$) равны: $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, $c = 1535 \text{ Дж/(кг·К)}$ [432]; $\lambda = 0,468 \text{ Вт/(м·К)}$ [309]; $a = 20,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Таблица 11-202

Коэффициент температуропроводности сухого молока $\alpha \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) при $T = 333 \text{ К}$ [79]

Сухое молоко	Плотность $\rho_{\text{м}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$			
	450	500	600	700
Цельное	22,0	24,0	26,6	—
Обезжиренное	28,0	26,3	25,0	23,9

Творог. ТФХ творога из жирного и обезжиренного молока заметно различаются (табл. 11-203, 11-204).

Таблица 11-203

Формулы для определения удельной теплоемкости и плотности творога при $T = 283 \div 353 \text{ К}$ [388, 349]

Творог	ОСВ, %	Ж, %	c , Дж/(кг·К)	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$
Из обезжиренного молока	19,0	—	$c = 4033 - 0,45T$	$\rho = 1111 - 0,2T - 0,0088(T - 273)^2$
Из жирного молока	24,0	46,0	$c = 3760 + 0,17T$	$\rho = 1111 - 0,32T - 0,0092(T - 273)^2$

Таблица 11-204

Теплофизические характеристики творога [388, 349]

Творог ¹	T , К	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, $\text{м}^2/\text{с}$
Из обезжиренного молока	291	1050	3903	0,53	13,0
Из жирного молока	292	1015	3810	0,44	11,0
	326	982	3815	0,53	14,1
Из жирного молока ¹	—	1060	3266	0,43	12,4

¹ По данным [209].

Значения коэффициента температуропроводности творога, вычисленные по формуле [402] и приведенные в табл. 11-204, различаются менее чем на 13%.

Коэффициенты тепло- и температуропроводности высушенного сублимацией творога (с фруктовой добавкой) при $p=66$ Па [190]

ТФХ	Температура T , К				
	288	298	308	318	328
λ , Вт/(м·К)	0,235	0,201	0,181	0,158	0,145
$a \cdot 10^8$, м ² /с	17,2	16,2	14,8	13,9	13,3

Сыр. В интервале 286—276 К для сыра $\rho=1094$ кг/м³ и $\lambda=0,27$ Вт/(м·К) [311].

ТФХ жирного сыра (температура не указана) равны: $\rho=1080$ кг/м³, $c=2428$ Дж/(кг·К), $\lambda=0,35$ Вт/(м·К) и $a=13,3 \times 10^{-8}$ м²/с [209].

Таблица II-206

Коэффициент температуропроводности сыра и брынзы производства НРБ [273]

Продукт	Ш, %	Ж, %	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^8$ (м ² /с) при T , К					
				нагрев			охлаждение		
				286	300	310	305	295	278
Брынза									
«Витоша»	42	29	1080	9,30	10,00	11,30	10,10	9,40	8,62
«Балканская»	38	34	1070	8,80	9,55	11,00	9,60	8,90	8,03
Сыр из коровьего молока	50,2	25	1075	10,30	11,10	11,80	10,90	10,38	9,70
Сыр из овечьего молока	48,5	27	1065	9,95	10,70	11,40	10,40	9,85	9,10

Брынза. Коэффициент теплопроводности болгарской брынзы «Сердика» ($W=40\%$) равен 0,40 Вт/(м·К) [278].

Коэффициент температуропроводности брынзы (см. табл. II-206) меньше, чем сыра, так как в нем содержится меньше влаги.

Казеин. Плотность казеина зависит от вида молока, из которого он изготовлен (табл. II-207).

Таблица II-207

Плотность казеина ρ (в кг/м³) ($pH=7$) [384]

Казеин	Температура T , К					
	293	298	303	308	313	323
Коровьего молока	—	1290	1268	1255	1291	1349
Молока буйволницы	1359	1292	1246	1245	1270	1316

Таблица II-208

Плотность казеина ρ (в кг/м^3) при $T=303\text{ К}$ [384]

рН	Коровьего молока		Буйволячьего молока	
	клеистери- зованный	натуральный	клеистери- зованный	натуральный
3,00	1273	1403	1315	1393
7,00	1388	1456	1325	1422
10,00	1342	—	1319	—
11,20	—	—	1246	—
11,25	1268	—	—	—

Таблица II-209

Истинная, физическая и насыпная плотность казеина, сыворотки и лактозы [303]

Сухая чешуйка	ρ_n , кг/м^3	ρ_f , кг/м^3	ϵ_s , %	ρ_n , кг/м^3	ϵ_s , %
Казеин	1370	1120	19	—	—
Сыворотка	1560	950	39	570*	64
Лактоза	1475	1360	—	—	—

* По данным [209].

Сыворотка. Коэффициент теплопроводности творожной сыворотки [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$] в интервале 293—363 К равен [25]:

$$\lambda = 5,221 - 3,185 \cdot 10^{-2}T + 5,53 \cdot 10^{-5}T^2. \quad (\text{II-155})$$

Таблица II-210

Теплофизические характеристики сыворотки [209]

Материал	ρ_n и ρ , кг/м^3	c , $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\alpha \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$
Сухая сыворотка	570	1717	0,13	14,4
Сыворотка	1027	4082	0,54	12,8

Лактоза. Удельная теплоемкость сухой лактозы равна 1202 [432], 1256 $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ [304].

Удельная теплоемкость водного раствора лактозы с повышением температуры увеличивается, причем тем заметнее, чем больше в растворе содержится СВ (табл. II-211).

Таблица II-211

Формулы для определения удельной теплоемкости
лактозы [26]

СВ, %	T, К	c, Дж/(кг·К)
5	288—363	$c = 3812 + 1,0 T$
10	288—363	$c = 3559 + 1,4 T$
20	303—363	$c = 9700 + 3,7 T$
30	323—363	$c = 1670 + 6,2 T$
40	338—363	$c = 1028 + 7,5 T$

Таблица II-212

Плотность 5%-ного раствора лактозы [389]

T, К	283	293	303	313	323	333	343	353
ρ , кг/м ³	1020	1018	1015	1012	1007	1003	997	991

Таблица II-213

Коэффициент теплопроводности водного раствора лактозы
 λ [в Вт/(м·К)] [25]

СВ, %	Температура T, К					
	293	303	313	323	343	363
10	0,595	0,610	0,629	0,657	0,723	0,808
20	—	—	0,613	0,639	0,702	0,778
30	—	—	—	0,616	0,673	0,745
40	—	—	—	—	0,642	0,702

5. ЯЙЦА И ЯИЧНЫЕ ПРОДУКТЫ

Белок. С повышением температуры сухих веществ опресненного белка их удельная теплоемкость увеличивается и в температурных интервалах 243—293 и 263—293 К соответственно составляет 1047 и 1172 Дж/(кг·К) [400].

Таблица II-214

Удельная теплоемкость сухих веществ яйца с_{св} [в Дж/(кг·К)] [394]

Продукт	Т, К				
	233	273	273—300	293	300—339
Белок	1047	1127	—	1256	—
Желток	1549	—	—	1842	—
Яичный порошок	—	—	1580	—	1675

Коэффициент теплопроводности сухих веществ белка, высушенного сублимацией, при $T=314$ К равен: 0,039 (при атмосферном давлении) и 0,013 Вт/(м·К) (в вакууме) [407].

Таблица II-215

Формулы для определения удельной теплоемкости белка

W, %	T, К	c, Дж/(кг·К)	Источник
26,6—100	273	$c = 1298 + 28,9 W$	[394]
26,6—100	293	$c = 1717 + 24,8 W$	[394]
0—9,75	243—293	$c = 1047 + 20,9 W$	400
0—9,75	263—293	$c = 1172 + 25,0 W$	400
10—80	273—313	$c = 1260 + 30,8 W$	[395]

Значения удельной теплоемкости белка, вычисленные по формулам (табл. II-215) и приведенные в литературе [230, 260], различаются незначительно.

При $W=10\%$ и $T=273$ и 293 К удельная теплоемкость белка соответственно составляет 1340 и 1465 Дж/(кг·К) [394].

Таблица II-216

Удельная теплоемкость яйца с [в Дж/(кг·К)] [394]

Т, К	Вид продукта и его влажность, %						
	белок			желток		скорлупа	яйцо
	80,0	86,5	90,9	40,0	50,0	2,6	66,4
273—293	3622	3768	3873	3643	3768	963	3496
273—313	3643	3800	3894	3245	3433	984	3391
293—313	3664	3810	3915	3236	3098	1005	3308

Плотность белка (температура не указана) составляет от 1024—1045 [230, 260, 71, 231] до 1080 кг/м³ [230].

Коэффициент теплопроводности белка при $T=306\div311$ К равен 0,56 Вт/(м·К) [416]. Коэффициент теплопроводности белка, высушенного сублимацией, при атмосферном давлении ($T=314$ К, $W=52\%$ и $\rho=77$ кг/м³) равен 0,042 Вт/(м·К) [407].

Таблица II-217

Теплофизические характеристики белка и желтка при $T=293$ К

Продукт	W, %	ρ , кг/м ³	Источник	c , Дж/(кг·К)	Источник	λ , Вт/(м·К)	Источник	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Белок	87	1042	[230]	3875	[394]	0,56	[416]	13,9
Желток	48	1029	[230]	3055	[394]	0,34	[416]	11,7

Коэффициент температуропроводности белка рекомендуется рассчитывать по универсальной формуле (7) во введении. Этот коэффициент белка (при $T=293$ К), рассчитанный по универсальной формуле и по формуле с использованием известных значений c , ρ и λ (см. табл. II-217), различается всего на 1,5%.

Желток. С повышением температуры сухих веществ желтка их удельная теплоемкость увеличивается (см. табл. II-214). При одинаковой температуре удельная теплоемкость желтка больше, чем белка, так как в нем содержится жир, удельная теплоемкость которого относительно большая — 1760 Дж/(кг·К) [71].

Теплофизические характеристики сухих веществ желтка при $T=293$ К равны: $c=1842$ Дж/(кг·К) [510], $\lambda=0,36$ Вт/(м·К) и $a \cdot 10^8=18,0$ м²/с [145], $\rho=1086$ кг/м³.

С повышением влажности желтка его удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] увеличивается и описывается следующими формулами [396, 394]:

при $T=293$ К и $11,5 < W < 100\%$

$$c = 2009 + 21,8W; \quad (\text{II-156})$$

при $T=273\div313$ К и $10 < W < 50\%$

$$c = 2655 + 11,8W. \quad (\text{II-157})$$

Значения удельной теплоемкости желтка, вычисленные по формулам (II-156 и II-157) и приведенные в литературе [230], различаются незначительно.

С повышением температуры желтка его удельная теплоемкость уменьшается (см. табл. II-216).

Плотность желтка меньше плотности белка и составляет (температура не указана) от 1028 [71, 230, 231] до 1075 кг/м³ [333].

Коэффициент теплопроводности желтка при $T=306$ К равен 0,33 Вт/(м·К) [416].

Коэффициент температуропроводности желтка рекомендуется рассчитывать по универсальной формуле [см. формулу (7) во введении].

Этот коэффициент желтка при $T=293$ К, рассчитанный по универсальной формуле и по формуле с использованием известных его значений c , ρ и λ (табл. II-217), различается всего на 0,8%.

Яйца. Значение удельной теплоемкости яйца, вычисленное по формуле аддитивности и равное 3335 Дж/(кг·К), незначительно отличается от экспериментальных [230, 260, 86, 259, 209, 121].

Удельная теплоемкость яйца меньше, чем меланжа, из-за небольшого значения этой теплофизической характеристики скорлупы (см. табл. II-216) и при $T=273\div 300$ К составляет 3559 Дж/(кг·К) [389].

Плотность яйца колеблется от 1000 до 1095 кг/м³ [86, 121, 231, 333, 385]. В процессе хранения яиц их плотность уменьшается примерно на 0,7 кг/м³ в месяц [230].

Теплофизические характеристики яйца при $T=293$ К и $W'=74\%$ равны: $c=3232$ Дж/(кг·К), $\rho=1083$ кг/м³, $\lambda=0,43$ Вт/(м·К) и $a=12,3\cdot 10^{-8}$ м²/с [333].

Экспериментально установлено, что при охлаждении яиц воздухом (при постоянной его скорости) температурное поле яиц регулируется. При начальной температуре яиц 298,5 К и температуре воздуха 276,6 К темп охлаждения определяется скоростью движения воздуха и при $v=0,54; 0,97; 1,84$ и $3,06$ м/с соответственно составляет 6,92; 7,89; 9,81 и 11,67 с⁻¹ [332].

Коэффициент теплопроводности слоя яиц [в Вт/(м·К)] зависит от направления теплового потока и перепада температуры в слое Δt , а именно:

при тепловом потоке, направленном вверх,

$$\lambda = 0,283 + 0,00585\Delta T; \quad (\text{II-158})$$

при тепловом потоке, направленном вниз,

$$\lambda = 0,262 + 0,00100\Delta T. \quad (\text{II-159})$$

Формулы (II-158 и II-159) справедливы для слоя, пористость которого 47%, толщина 140 мм и $\Delta T=5\div 25$ К, а температура необогреваемой поверхности 295 К [301].

Яичный порошок и меланж. С повышением температуры сухих веществ яичного порошка его удельная теплоемкость увеличивается (см. табл. II-124).

С повышением влажности яичного порошка и меланжа их удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] увеличивается и в интервале 300—339 К может быть определена по формулам [230]:

$$\text{при } 0 < W < 5,6\% \quad c = 1675 + 46W; \quad (\text{II-160})$$

$$\text{при } 5,6 < W < 14,5\% \quad c = 1800 + 31W. \quad (\text{II-161})$$

Совместная обработка экспериментальных данных по удельной теплоемкости меланжа [в Дж/(кг·К)] позволила предложить формулу, которая справедлива при $W=14,5\div 74\%$ [230]:

$$c = 2048 + 15,5W. \quad (\text{II-162})$$

Значения удельной теплоемкости яичного порошка и меланжа, которые вычислены по формулам (II-160 и II-161) и приведены в литературе [86, 145], различаются незначительно.

Таблица 11-218

Теплофизические характеристики меланжа ($W=74\%$) [216]

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$
278	1024	3810	0,46	11,7
288	1015	3747	0,46	12,2
298	1015	3642	0,47	12,8

Плотность меланжа (в кг/м^3) зависит не только от температуры, но и от времени года. В интервале 283—323 К она равна [180]:
весенний отбор

$$\rho = 1049 - 0,044T; \quad (\text{II-163})$$

зимний отбор

$$\rho = 1050 - 0,057T. \quad (\text{II-164})$$

При комнатной температуре плотность меланжа равна 1030—1040 кг/м^3 , насыпная плотность яичного порошка — 320 кг/м^3 [230].

При $T=273 \text{ K}$ и $W=72,5\%$ теплофизические характеристики меланжа равны [246]: $c=3520 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,39 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ и $\alpha \cdot 10^3=11,4 \text{ м}^2/\text{с}$.

Коэффициент температуропроводности меланжа рекомендуется рассчитывать по универсальной формуле [см. формулу (7) во введении]. Значения этого коэффициента, рассчитанные по этой формуле и приведенные в табл. 11-218, различаются менее чем на 5%.

6. ПИЩЕВЫЕ ЖИРЫ

ЖИВОТНЫЕ ЖИРЫ

Теплоемкость животного жира определяется его состоянием (твердый, жидкий), направлением теплового потока (нагрев, охлаждение), скоростью изменения температуры. Особенно существенное изменение удельной теплоемкости жира происходит в процессе плавления сложных глицеридов, входящих в его состав (табл. 11-219).

Таблица 11-219

Удельная теплоемкость и температура плавления жира [201, 199]

Жир	c [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] при состоянии		Температурный интервал плавления T, K	c [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] в процессе плавления
	твердом	жидком		
Говяжий	3618	2512	298,4—319,8	6867
Бараний	647	2512	298,3—321,3	6364
Свиной	3362	2512	291,8—301,9	11,431
Шпик	3107	2512	—	—

Способ охлаждения и нагревания жира и скорость изменения температуры оказывают влияние на его температуры отвердевания и плавления, а следовательно, на зависимость $c=f(T)$ [159].

Таблица II-220

Удельная теплоемкость свиного жира c [в Дж/(кг·К)] [392, 130]

Температура T , К				
278	288	298	308	318
4195	2780	4200	4200	3475
4606	2554	4195	2470	2303
4860	3320	5920	3210	2110

Таблица II-221

Удельная теплоемкость жира c [в Дж/(кг·К)]

Жир	Температура T , К						Источник
	278	288	298	308	318	328	
Шпик	—	—	4250	3500	2400	2500	[204]
Говяжий	2780	4190	2721	4061	5778	—	[392]
	3320	4370	3450	3450	5970	—	[130]
Копытный	5568	2177	2100	2100	2100	—	[392]
Китовый необра- ботанный	2721	2800	2386	1967	1967	—	[392]

Для свиного жира в жидком состоянии зависимость удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] от температуры описывается формулой [159]

$$c = -975 + 9,3T. \quad (\text{II-165})$$

Таблица II-222

Формулы для определения плотности жира

Жир	T , К	ρ , кг/м ³	Источник
Говяжий	278—303	$\rho = 1377 - 1,5 T$	[343]
Бараний топленый	323—363	$\rho = 1124 - 0,75 T$	[198]
надпочечный	323—363	$\rho = 1124 - 0,75 T$	[198]
рубашечный	323—363	$\rho = 1100 - 0,65 T$	[198]
курдючный	283—333	$\rho = 1148 - 0,6 T$	[204]
Шпик	283—323	$\rho = 1132 - 0,5 T$	[204]
	333—348	$\rho = 1549 - 1,8 T$	[83]
	323—343	$\rho = 1585 - 2,0 T$	[204]

Плотность и температурный коэффициент объемного расширения жира [198, 60]

Жир	ρ (в кг/м³) при T , К		$\rho \cdot 10^3$ (в К ⁻¹) в интервале 323—368 К
	323	373	
Говяжий	885	855	0,72
Бараний			
надпочечный	888	859	0,66
рубашечный	889	—	0,75
курдючный	890	860	0,73
Свиной	890	865	0,58
Костный	—	900	1,30

Коэффициенты теплопроводности для сырого и топленого говяжьего жира при одной и той же температуре различаются незначительно и соответственно составляют 0,150 и 0,147 Вт/(м·К) [22].

С повышением температуры жира коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] увеличивается [290, 412, 245, 204, 424]: для шпика [290]

$$\lambda = 0,05 + 0,000417; \quad (\text{II-156})$$

для говяжьего жира при $T = 292 \div 307$ К [412]

$$\lambda = -1,60 + 0,00677; \quad (\text{II-167})$$

для лярда ($\rho = 905$ кг/м³) при $T = 275 \div 293$ К [424]

$$\lambda = -0,35 + 0,00187. \quad (\text{II-168})$$

Коэффициент теплопроводности жира в процессе плавления (λ_n) больше, чем в твердом состоянии (λ_t). Отношение λ_n к λ_t для говяжьего, свиного и бараньего жира соответственно составляет 1,4; 2,4 и 2,0 [199].

В процессе нагрева в герметичном патроне свиного шпика ($\rho = 995$ кг/м³) от 293 до 353 К его коэффициенты тепло- и теплопроводности увеличиваются с повышением параметров обогревающего воздуха — T_v и v_v (табл. II-224).

Т а б л и ц а II-224

Коэффициенты тепло- и теплопроводности свиного шпика [21]

T_v (в К) при $v_v = 2,8$ м/с	λ_n Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м²/с	v_v (в м/с) при $T = 387$ К	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^3$, м²/с
353	0,17	7,0	1,33	0,16	7,3
387	0,18	7,7	2,80	0,18	7,7
401	0,22	8,9	4,28	0,20	8,2

Таблица II-225

Коэффициенты тепло- и температуропроводности жира-сырца при охлаждении от 303—308 до 277—278 К [245]

ТФХ	Влажность W, %						
	0	5	10	15	20	25	30
λ , Вт/(м·К)	0,087	0,104	0,116	0,139	0,209	0,267	0,348
$a \cdot 10^8$, м²/с	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	6,8	7,0

Таблица II-226

Коэффициенты тепло- и температуропроводности измельченного свиного шпика ($W=13,72$ и $Ж=79,96\%$) [204]

ТФХ	Т, К			
	313	323	333	343
λ , Вт/(м·К)	0,20	0,20	0,22	0,30
$a \cdot 10^8$, м²/с	8,0	9,5	9,5	12,9

Таблица II-227

Коэффициенты тепло- и температуропроводности жира в процессе охлаждения от 303—308 до 277—278 К [245]

Жир	W, %	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м²/с
Сальник	2	0,093	5,53
Брыжжеечный	15—16	0,180	6,33
Кишечный	29,54	0,345	7,05
Костный	—	0,187	5,94

РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА

В соответствии с данными [75] удельную теплоемкость масел можно рассчитать по формуле

$$c_T = A c_{\text{ид}} \left(\frac{P_{\text{ид}}}{P_T} \right)^{1/3}, \quad (\text{II-169})$$

где A — постоянная независимая от вида масла, она определяется температурой, а именно:

$$\text{при } 273 < T < 363 \text{ К} \quad A = 0,439 + 0,00185T; \quad (\text{II-170})$$

$$\text{при } 363 < T < 423 \text{ К} \quad A = 0,275 + 0,0023T; \quad (\text{II-171})$$

Индексы «303» и «Т» означают температуру, при которой следует брать c и ρ .

Формулы для определения удельной теплоемкости и плотности масел

Растительное масло	T, К	c, Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	Источ-ник
Подсолнечное из семян № 8931	273—423	$c = 1021 + 3,10 T$	$\rho = 1116,1 - 0,68 T$	[205]
Подсолнечное	293—373	$c = 1513 + 2,19 T$	—	[59]
Подсолнечное рафинированное	273—423	$c = 527 + 4,25 T$	$\rho = 1031,4 - 0,70 T$	[205]
Хлопковое из семян хлопка № 108	273—423	$c = 446 + 4,41 T$	$\rho = 1121,0 - 0,68 T$	[205]
Хлопковое рафинированное	273—423	$c = 506 + 4,19 T$	—	[205]
Хлопковое жидкое	288—333	$c = 1238 + 2,55 T$	—	[292]
Хлопковое незначительно гидратированное	313—343	$c = 1361 + 2,30 T$	—	[292]
Хлопковое гидратированное	353—492	$c = 1396 + 2,24 T$	—	[230]
Хлопковое значительно гидратированное	333—353	$c = 810 + 4,06 T$	—	[230]
Соевое (Амурское)	353—423	$c = 976 + 2,87 T$	$\rho = 1121,9 - 0,69 T$	[205]
Соевое	353—483	$c = 957 + 3,1 T$	—	[230]
Соевое рафинированное	353—483	—	$\rho = 1109,6 - 0,68 T$	[205]
Кукурузное	323—423	$c = 795 + 3,14 T$	$\rho = 1119,3 - 0,68 T$	[205]
Кунжутное	273—423	$c = 1020 + 3,15 T$	$\rho = 1118,1 - 0,68 T$	[205]
Виноградное (из виноградных косточек)	303—423	$c = 720 + 3,11 T$	$\rho = 1118,9 - 0,68 T$	[205]
Арахисовое твердое	300—330	$c = 1601 + 1,67 T$	—	[292]
Арахисовое тертое	293—353	$c = 141 + 5,0 T$	—	[230]
Арахисовое жидкое гидратированное	320—350	$c = 636 + 4,9 T$	—	[292]
Арахисовое жидкое	293—353	$c = 475 + 5,0 T$	—	[389]

Поскольку отношение ρ_{303} к ρ_{423} масел не превышает 1,098 [205], формула (II-169) принимает вид:

$$\text{при } 273 < T < 363 \text{ К} \quad C_T = C_{303} (0,439 + 0,00185T); \quad (\text{II-172})$$

$$\text{при } 363 < T < 423 \quad C_T = C_{303} (0,275 + 0,0023T). \quad (\text{II-173})$$

Т а б л и ц а II-229

Средняя удельная теплоемкость масел в интервале $T = 273 \div 323 \text{ К}$ [392]

Масло	c , Дж/(кг·К)	Масло	c , Дж/(кг·К)
Подсолнечное	2139	Кукурузное	2223
Оливковое	2206	Хлопковое	2419
Кокосовое	4277	Арахисовое	2316
Соевое	2206		

Т а б л и ц а II-230

Плотность подсолнечного масла ρ (в кг/м^3) [40]

T , К	Давление p , кПа				
	0	49	98	1471	2942
323	906,6	911,5	914,9	918,2	919,9
343	896,1	901,7	904,1	908,2	909,9
363	884,1	890,4	893,6	896,8	898,4
383	871,8	878,7	881,8	885,7	887,3
403	858,3	866,5	870,3	874,1	876,4
423	843,8	853,2	857,6	862,1	863,5
443	827,8	838,2	843,8	848,8	851,0
463	811,0	822,4	829,1	834,7	837,5

Коэффициент теплопроводности масел в интервале температур 253—423 К рекомендуется [45] рассчитывать по универсальной формуле (1) во введении. Необходимые для этого значения констант B и плотности масел приведены в табл. II-228 и II-231.

Константа B масел

Масло	$B \cdot 10^4$	Масло	$B \cdot 10^4$
Подсолнечное		Соевое (Амурское)	0,190
из семян № 8931	0,180	Кукурузное	0,187
рафинированное	0,180	Кунжутное	0,194
Хлопковое из семян	0,201	Виноградное (из косточек)	0,179
№ 108			

Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности масел [205] и рассчитанные по универсальной формуле различаются незначительно.

Несовпадение значений констант B , приведенных в табл. II-231 и в [45], определяется методом их расчета.

Коэффициент теплопроводности оливкового масла [в Вт/(м·К)] в интервале температуры 271—414 К равен [446]:

$$\lambda = 0,186 - 0,000062T. \quad (\text{II-174})$$

Коэффициент температуропроводности масла (в м²/с) в интервале 273—423 К можно рассчитывать в соответствии с универсальной формулой (7) во введении по равенству

$$a = \frac{B}{c}, \quad (\text{II-175})$$

Необходимые для этого значения констант B и удельной теплоемкости масел даны в табл. II-231 и II-228.

Значения коэффициента теплопроводности кунжутного масла, полученного экспериментально (табл. II-232) и рассчитанного по универсальной формуле, различаются менее чем на 3%.

Таблица II-232

Коэффициент теплопроводности масла [445]

Масло	T, K	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot K}$	Масло	T, K	$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot K}$
Лимонной кожуры	283	0,170	Арахисовое	277	0,169
Мускатного ореха	277	0,156	Маковое	277	0,169
Оливковое	373	0,163	Кунжутное	277	0,175
			Сладкого миндаля	277	0,177

МАРГАРИН И КУЛИНАРНЫЕ ЖИРЫ

Маргарин. Удельную теплоемкость [в Дж/(кг·К)] и плотность (в кг/м³) пищевого саломаса в интервале 273÷423 К рекомендуется определять по формулам [205]:

из подсолнечного масла

$$c = 1209 + 3,16T \quad \rho = 1111 - 0,68T; \quad (\text{II-176}), (\text{II-177})$$

из хлопкового масла

$$c = 1016 + 3,35T; \quad \rho = 1109 - 0,68T. \quad (\text{II-178}), (\text{II-179})$$

В интервале температуры 273—328 К удельная теплоемкость маргарина равна 3734 Дж/(кг·К) [392].

Т а б л и ц а II-233

Теплофизические характеристики столового маргарина [216]

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$
288	930	3182	0,205	6,94
308	910	3328	0,207	6,80
332	902	3337	0,207	6,80

Т а б л и ц а II-234

Теплофизические характеристики сливочного маргарина [260]

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$
295	920,4	2114	0,165	7,33
299	917,2	2227	0,172	7,05
303	914,0	2328	0,173	6,83
305	—	—	0,179	6,67

Т а б л и ц а II-235

Теплофизические характеристики жидкой эмульсии маргарина [234]

Эмульсия маргарина	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$
Животная	313	909	2052	0,200	10,9
	323	904	2052	0,197	10,7
Безмолочная	313	920	1842	0,186	10,9
	323	914	1842	0,174	10,3
Сливочная	313	928	1633	0,209	13,5
	323	920	1633	0,209	13,6

Теплофизические характеристики маргарина [234]

Маргарин	ТФХ	Температура T , К				
		278	283	288	293	298
Животный	ρ , кг/м ³	930	928	916	908	900
	c , Дж/(кг·К)	2847	2763	2638	2512	2428
	λ , Вт/(м·К)	0,174	0,172	0,171	0,169	0,167
	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0
	a , м ² /с	946	940	934	928	920
Безмолочный	ρ , кг/м ³	946	940	934	928	920
	c , Дж/(кг·К)	2847	2721	2596	2470	2345
	λ , Вт/(м·К)	0,195	0,182	0,169	0,158	0,146
	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3
	a , м ² /с	932	924	916	908	900
Сливочный	ρ , кг/м ³	932	924	916	908	900
	c , Дж/(кг·К)	2638	2554	2428	2308	2177
	λ , Вт/(м·К)	0,188	0,179	0,172	0,160	0,152
	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	7,1	7,3	7,3	7,6	7,7
	a , м ² /с	7,1	7,3	7,3	7,6	7,7

Коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] молочного маргарина ($\rho=925$ кг/м³) в интервале температуры 275—295 К равен [424]:

$$\lambda = -0,106 + 0,001157T \quad (\text{II-180})$$

Кулинарные жиры. Для определения зависимости удельной теплоемкости жиров [в Дж/(м·К)] от продолжительности нагрева ($\tau=0\div 30$ ч) при $T=453$ К рекомендованы формулы [241]:
жир «Украинский»

$$c = 2386(1 - 0,010157\tau); \quad (\text{II-181})$$

жир «Белорусский»

$$c = 2554(1 - 0,008\tau). \quad (\text{II-182})$$

Таблица II-237

Формулы для определения удельной теплоемкости жира при $T=353\div 453$ К [241]

Продолжительность нагрева τ , ч	c , Дж/(кг·К)	
	жир «Украинский»	жир «Белорусский»
0	$c = 1249 + 2,517T$	$c = 1227 + 2,937T$
10	$c = 1229 + 2,097T$	$c = 1143 + 2,937T$
20	$c = 1020 + 2,097T$	$c = 956 + 2,517T$
30	$c = 926 + 1,677T$	$c = 979 + 2,097T$

Плотность жира ρ (в кг/м³) [14]

Жир	ρ , кПа	Температура T , К							
		333	353	373	393	413	433	453	473
«Украинский»	101	860	840	830	820	790	760	730	710
	35	850	830	820	810	780	750	720	700
	8	840	820	810	800	770	740	760	750
«Белорусский»	101	840	830	820	810	790	770	760	750
	35	830	820	810	800	780	760	750	730
	8	820	810	800	790	770	760	740	720

Для определения зависимости плотности (в кг/м³) жиров ($T = 453$ К и $\rho = 101,3$ кПа) от продолжительности нагрева ($\tau = 0 \div 30$ ч) справедливы формулы [82]:

жир «Украинский»

$$\rho = 730 + 1,8\tau; \quad (\text{II-183})$$

жир «Белорусский»

$$\rho = 760 + 0,7\tau. \quad (\text{II-184})$$

В соответствии с универсальной формулой (1) во введении коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] для жиров в интервале температуры 333—453 К описывается формулами [82]:

жир «Украинский»

$$\lambda = 0,196 \cdot 10^{-3}\rho; \quad (\text{II-185})$$

жир «Белорусский»

$$\lambda = 0,193 \cdot 10^{-3}\rho. \quad (\text{II-186})$$

В [82] показано, что константа B в универсальной формуле не зависит от продолжительности выдержки жира при $T = 453$ К. Поэтому в соответствии с формулами (II-183) ÷ (II-186) коэффициент теплопроводности жира [в Вт/(м·К)] в процессе термообработки при $T = 453$ К равен:

жир «Украинский»

$$\lambda = 0,196 \cdot 10^{-3}(730 + 1,8\tau); \quad (\text{II-187})$$

жир «Белорусский»

$$\lambda = 0,193 \cdot 10^{-3}(760 + 0,7\tau), \quad (\text{II-188})$$

Зависимость коэффициента теплопроводности жиров [в Вт/(м·К)] от продолжительности нагрева можно рассчитать по следующим формулам:

жир «Украинский»

$$\lambda = 0,149(1 + 6,0 \cdot 10^{-5}\tau^2); \quad (\text{II-189})$$

жир «Белорусский»

$$\lambda = 0,147(1 + 4,5 \cdot 10^{-5}\tau^2). \quad (\text{II-190})$$

В соответствии с формулами (II-185 и II-186) и формулой $c = -f(T)$ при $\tau = 0$ (табл. II-237) коэффициент температуропроводности жиров (в $\text{м}^2/\text{с}$) равен:
жир «Украинский»

$$a \cdot 10^8 = 7808,8 / (497,6 + T); \quad (\text{II-191})$$

жир «Белорусский»

$$a \cdot 10^8 = 6587,0 / (418,8 + T). \quad (\text{II-192})$$

При $T = 453 \text{ К}$ зависимость коэффициента температуропроводности жира (в $\text{м}^2/\text{с}$) от продолжительности его нагрева [в соответствии с формулами (II-181, II-182, II-187 и II-188)] равна:

жир «Украинский»

$$a \cdot 10^8 = 8,2 / (1 - 0,010\tau); \quad (\text{II-193})$$

жир «Белорусский»

$$a \cdot 10^8 = 7,6 / (1 - 0,008\tau). \quad (\text{II-194})$$

Удельная теплоемкость кондитерского жира из пальмоядрового масла в жидком виде в интервале температуры 309—323 К равна [158]:

$$c = 435 + 50T. \quad (\text{II-195})$$

7. ПРОДУКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА, ХЛЕБНЫЕ И МУЧНЫЕ КОНДИТЕРСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

МУКА

Удельная теплоемкость сухих веществ муки [в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$] при комнатной температуре составляет 1256—1884 $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [287, 381, 422, 441, 103, 54, 263], а с повышением температуры (от 273 до 333 К) она увеличивается [441]:

$$c_{\text{св}} = 905 + 1,2T. \quad (\text{II-196})$$

Таблица II-239

Энтальпия сухих веществ муки i (в $\text{Дж}/\text{кг}$) [441]

W, %	Температура T , К						
	273	283	293	303	313	323	333
0	0	12,477	25,164	38,102	51,291	64,689	78,297
5	—60,837	—46,643	—32,198	—17,531	—2,596	12,561	27,969
10	—86,545	—70,258	—53,719	—36,929	—19,888	—2,595	14,948
15	—103,712	—84,954	—65,903	—46,601	—27,048	—7,201	12,896
20	—112,714	—90,983	—69,001	—57,990	—24,243	—1,424	21,689

Теплофизические характеристики сухих веществ
муки [263]

ρ_m , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с
600	1467	0,088	10,01
700	1508	0,104	10,01

Значения ТФХ сухих веществ муки I сорта приведены в табл. II-243.

Экспериментально установлено, что удельная теплоемкость муки практически не зависит от места произрастания зерна, из которого она получена [230].

Удельную теплоемкость [в Дж/(кг·К)] муки ($W=0 \div 40\%$) рекомендуется рассчитывать по формуле аддитивности, т. е.

$$a = 1256 + 29,31W. \quad (\text{II-197})$$

Экспериментальные значения удельной теплоемкости муки [441, 287, 230, 422, 381] и рассчитанные по формуле (II-197) различаются незначительно.

Зависимость удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] муки ($W=14\%$) от температуры в интервале $T=268 \div 308$ К выражается формулой [230]

$$c = -652 + 8,37T. \quad (\text{II-198})$$

При одновременном изменении влажности муки (от 0 до 20%) и температуры (от 273 до 333 К) ее удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] равна [441]:

$$c = 604 + 2,31T + 18,46W + 0,48W^2. \quad (\text{II-199})$$

Значения удельной теплоемкости муки ($W=14\%$ и $T=293$ К), которые вычислены по формулам (II-197) ÷ (II-199), различаются между собой максимально на 10%.

Плотность муки практически не зависит от ее вида, а насыпная плотность определяется способом укладки (табл. II-241).

Таблица II-241

Плотность и насыпная плотность муки [253, 353]

Сорт муки	W, %	ρ , кг/м ³	W, %	ρ_m , кг/м ³ при укладке	
				рыхлой	плотной
Пшеничная					
высшего сорта	12,6	1460	12,6—15,6	677	770—900
I сорта	13,6	1460	12,2—13,7	484—600	725—900
II сорта	13,8	1440	13,8	473	770—900
Ржаная обойная	14,0	1450	14,0	465	770—900
Кукурузная	—	1409	—	—	—

Коэффициент теплопроводности муки не зависит от ее сорта (табл. II-242).

Таблица II-242

Теплофизические характеристики муки [230, 139]

Мука	T, K	$W, \%$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Пшеничная					
высший сорт	293	13,0	788	0,13—0,14	8,8—9,7
I сорт	293	12,9	788	0,13—0,14	9,0—9,5
II сорт	293	12,7	788	0,14—0,15	9,7—9,8
Ржаная					
обдирная	294	11,6	542	0,164	22,4
обойная	294	11,8	547	0,164	22,4

Коэффициент теплопроводности муки с повышением температуры увеличивается [230, 97]. Для коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] пшеничной муки высшего сорта ($W=14\%$) при $\rho_n=762 \text{ кг/м}^3$ в интервале температуры 268—308 К справедлива формула [111]

$$\lambda = -0,016 + 0,000467T. \quad (\text{II-200})$$

Таблица II-243

Теплофизические характеристики муки I сорта ($\rho_n=700 \text{ кг/м}^3$) [97]

T, K	$\lambda \text{ [в Вт/(м}\cdot\text{K)] при } W, \%$					$\alpha \cdot 10^8 \text{ (в м}^2/\text{с) при } W, \%$				
	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
293	0,117	0,143	0,172	0,217	0,255	10,2	10,5	10,8	11,5	12,6
313	0,123	0,152	0,181	0,230	0,260	10,4	10,6	11,0	11,9	12,7
333	0,130	0,155	0,187	0,243	0,269	10,5	10,7	11,2	12,0	12,8

Коэффициент теплопроводности муки с повышением влажности увеличивается [87, 97, 230].

При $T=298 \text{ K}$ в интервале $W=4\div 46\%$ коэффициент теплопроводности муки [в Вт/(м·К)] (насыпная плотность не указана) равен [87]:

мука пшеничная

$$\lambda = 0,084 + 0,0034W; \quad (\text{II-201})$$

мука соевая

$$\lambda = 0,093 + 0,0023W; \quad (\text{II-202})$$

мука ржаная

$$\lambda = 0,083 + 0,0020W. \quad (\text{II-203})$$

Теплофизические характеристики муки ($W=11,4\div 11,7\%$) при $T=293\div 295$ К [139]

Мука	ρ_n , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Ржаная обдирная	542	1355	0,164	22,4
	626	1301	0,181	22,5
	660	1328	0,197	22,4
Обойная	547	1342	0,164	22,4
	623	1301	0,170	22,4
Пшеничная высший сорт	595	1175	0,168	24,1
	706	1094	0,186	24,2
	580	1035	0,143	23,9
	506	1203	0,147	24,3

По данным [230] коэффициент теплопроводности пшеничной муки 72% ($\rho_n=440$ кг/м³) при комнатной температуре равен 0,081 ($W=8\%$) и 0,210 Вт/(м·К) ($W=23\%$).

Экспериментальные данные по коэффициенту теплопроводности [в Вт/(м·К)] пшеничной муки I сорта ($\rho_n=700$ кг/м³) в интервале $W=0\div 20\%$ и $T=293\div 333$ К (см. табл. II-243) позволяют рекомендовать формулу [230]

$$\lambda = 0,0290 + 0,00037T + 0,00285W. \quad (\text{II-204})$$

Коэффициент температуропроводности муки не зависит от ее сорта [230, 87].

Насыпная плотность муки не оказывает заметного влияния на ее коэффициент температуропроводности (см. табл. II-244).

Зависимость коэффициента температуропроводности муки (в м²/с) от влажности ($W=2\div 47\%$) при $T=298$ К описывается формулой [87]

$$a \cdot 10^8 = 23,2 + 0,045W. \quad (\text{II-205})$$

Экспериментальные значения коэффициента температуропроводности муки ($W=11,4\div 11,7\%$) [139] и вычисленные по формуле (II-205) различаются незначительно.

ТЕСТО ДЛЯ ХЛЕБНЫХ ИЗДЕЛИЙ. ТЕСТО-ХЛЕБ

Тесто для хлебных изделий. Значения удельной теплоемкости сухих веществ теста приведены в табл. II-258.

Удельная теплоемкость теста [в Дж/(кг·К)] может быть определена по формуле аддитивности [53]

$$c = 1675 + 25,1W. \quad (\text{II-206})$$

Плотность теста-хлеба существенно изменяется на разных этапах его приготовления (табл. II-245).

Плотность теста и хлеба ρ (в кг/м^3) [203]

Изделие	ρ теста после технологического процесса						ρ изделия
	замеса	брожения	доявления	поступающего	запекания	выпекания	
Батоны нарезные из муки I сорта	1180	900	1040	1040	1080	670	400
Городские булки из муки I сорта	1100	840	1040	1050	1040	680	410
Паляница из муки I сорта	1140	880	1030	1040	—	690	440
Сдоба обыкновенная из муки I сорта	1190	830	—	—	1090	600	370
Слойка из муки высшего сорта	1110	820	1090	980	1020	590	—
Киевский арнаут из муки II сорта	1080	810	1060	1040	—	720	—
Хлеб украинский	1160	850	1090	—	—	780	—

Наиболее существенное влияние на плотность теста оказывает процесс брожения. Так, до брожения ржаного теста $\rho = 1080 \div 1120 \text{ кг/м}^3$, а через 60—80 мин после начала этого процесса — $790 \div 770 \text{ кг/м}^3$. Для ржаной головки соответственно 1113—1006 и $790 \div 680 \text{ кг/м}^3$ (после 240-минутного брожения) [151].

Таблица 11-246

Теплофизические характеристики пшеничного теста [341]

Этап приготовления хлеба %	c [в $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}]$ через τ , мин				λ [в $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}]$ через τ , мин				$a \cdot 10^6$ (в $\text{м}^2/\text{с})$ через τ , мин			
	0	30	60	150	0	30	60	150	0	30	60	150
Замес	2550	2200	1700	2200	0,65	0,55	0,65	0,40	25	23	35	17
Брожение	2200	2500	2000	—	0,57	0,31	0,42	—	27	12	19	—

Совместная обработка экспериментальных данных по коэффициенту теплопроводности [в $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}]$ теста из пшеничной муки I сорта ($W = 41 \div 49\%$) при $T = 301 \div 313 \text{ К}$ [55, 139, 230] позволяет рекомендовать справедливую при $\rho = 586 \div 1150 \text{ кг/м}^3$ формулу

$$\lambda = 0,159 + 0,000263\rho. \quad (11-207)$$

Плотность теста ρ (в кг/м^3) [235]

Вид теста	Давление p , кПа			
	49	98	196	294
Пшеничное 72%-ное	1100	1160	1200	1220
85%-ное	1100	1140	1190	1210
96%-ное	1080	1130	1160	1180
Ржаное 95%-ное	1080	1120	1150	1170

Значения c и λ теста, вычисленные по формулам (II-206 и II-207), позволили определить его коэффициент температуропроводности (табл. II-248).

Таблица II-248

Коэффициент температуропроводности теста
($W=45\%$) из пшеничной муки I сорта при
 $T=307\text{ K}$

ρ , кг/м^3	600	700	800	900
$a \cdot 10^8$, $\text{м}^2/\text{с}$	18,8	17,5	16,4	15,7

Экспериментальные значения коэффициента температуропроводности муки [55] и значения, приведенные в табл. II-248, различаются незначительно.

Тесто-хлеб. Из данных по $i=f(W)$ следует, что средняя удельная теплоемкость теста пшеничного хлеба при $W=10, 20, 30, 40$ и 50% в интервале температур $273-313\text{ K}$ соответственно равна $1591, 2093, 2512, 2721$ и $2826\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Зависимость удельной теплоемкости [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] для теста-хлеба (без учета расхода тепла на испарение) от температуры (при $T=303-373\text{ K}$) выражается формулой [139]

$$c = c_{303} + 17(T - 303), \quad (\text{II-208})$$

где c_{303} — удельная теплоемкость теста-хлеба при $T=303\text{ K}$ (см. табл. II-250).

Удельная теплоемкость (без учета расхода тепла на испарение) теста-хлеба [139]

Тесто-хлеб	W или W^c , %	T , К	c , Дж/(кг·К)
Из пшеничной муки	$W = 0 \div 30$ $W > 30$	273—313	$c = 1175 + 31 W$ $c = 41,87 W +$ $+ c_{св}'(100 - W) *$
Из ржаной муки	$W^c = 0 \div 60$ $W^c > 60$	293 293	$c = 2800 + 2,7 W^c$ $c = 2300 + 11,0 W^c$
I сорта	$W^c = 0 \div 60$ $W^c > 60$	293 293	$c = 2700 + 2,5 W^c$ $c = 2150 + 12,0 W^c$
II сорта	$W^c = 0 \div 60$ $W^c > 60$	293 293	$c = 2200 + 2,2 W^c$ $c = 1190 + 11,0 W^c$

* При $T = 233, 273$ и 313 К $c_{св}'$ соответственно равна 16,33; 16,24 и 17,67 Дж/(кг·К).

Таблица II-250

Удельная теплоемкость теста-хлеба [141]

Тесто-хлеб	c , Дж/(кг·К)		
	при $T = 303$ К	при $T = 373$ К	в интервале 303—373 К
Из пшеничной муки			
I сорта	2405	3560	2982
II сорта	2748	3952	3350
Из смеси ржаной (40%) и пшеничной (60%) муки	2303	3374	2838

Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] теста-хлеба (с учетом испарения влаги при повышении температуры (293—353 К) уменьшается [141]:

$$c = c_{293} - 1,7 (T - 273), \quad (\text{II-209})$$

где c_{293} — удельная теплоемкость теста-хлеба при $T = 293$ К. Она равна для ржаного теста-хлеба при $W^c = 80\%$ 3090 Дж/(кг·К) и при $W^c = 32\%$ 2890, для теста-хлеба из муки I сорта при $W^c = 30\%$ 2890 Дж/(кг·К).

Энтальпия (в кДж/кг) теста пшеничного хлеба ($W = 36\%$) в интервале $T = 273 \div 303$ К равна [373]:

$$i = -484,8 + 2,374T. \quad (\text{II-210})$$

Удельная теплоемкость теста-хлеба (из пшеничной муки I сорта) [в Дж/(кг·К)] при разном содержании сахара ($Ca = 10-15\%$), жира ($Ж = 10 \div 15\%$) и влажности равна [141]:

$$c = 2900 + 22Ca - 17Ж + 3W^c. \quad (\text{II-211})$$

Плотность и коэффициент теплопроводности теста-хлеба [230]

Продолжи- тельность выпечки, мин	Ржаной			Пшеничный		
	W, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	W, %	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
5	47	700	0,32	51	435	0,15
7	46	648	0,24	49	388	0,14
10	45	520	0,24	42	370	0,14
15	43	581	0,23	38	353	0,14
20	40	520	0,19	37	320	0,13

Коэффициент теплопроводности теста-хлеба (из пшеничной муки I сорта) [в Вт/(м·К)] при разном содержании жира ($Ж=10\div 20\%$) и сахара ($Са=10\div 20\%$) с повышением влажности сначала возрастает, а затем снижается [141]:

при

$$0 < W^c < W_{\text{макс}}^c$$

$$\lambda = 0,152 + 0,001Ca - 0,0012Ж + 0,007W^c; \quad (\text{II-212})$$

при

$$W_{\text{макс}}^c < W^c < 100\%$$

$$\lambda = \lambda_{\text{макс}} - 0,001(W^c - W_{\text{макс}}^c). \quad (\text{II-213})$$

Таблица II-252

Формулы для определения коэффициента тепло- и температуропроводности теста-хлеба при $T=293\text{ К}$ [141]

Тесто-хлеб	W^c , %	λ , Вт/(м·К): a , м ² /с	W^c , %	λ , Вт/(м·К): a , м ² /с
Из пшеничной муки I сорта	0—30	$\lambda = 0,152 + 0,007W^c;$ $a \cdot 10^8 = 13,4 + 0,37W^c$	30—	$\lambda = 0,345 -$
			100	$-0,001W^c;$ $a \cdot 10^8 = 23,2 - 0,053W^c$
II сорта	0—25	$\lambda = 0,135 + 0,0068W^c;$ $a \cdot 10^8 = 12,8 + 0,40W^c$	25—	$\lambda = 0,305 -$
			100	$-0,0003W^c;$ $a \cdot 10^8 = 22,2 - 0,057W^c$
Из ржаной муки	0—30	$\lambda = 0,237 + 0,007W^c;$ $a \cdot 10^8 = 14,4 + 0,35W^c$	30—	$\lambda = 0,44 -$
			100	$-0,00045W^c;$ $a \cdot 10^8 = 24,9 - 0,059W^c$

Влажность теста-хлеба (в %), которая соответствует максимальному коэффициенту теплопроводности ($W_{\text{макс}}^*$), рекомендовано определять по формуле [141]

$$W_{\text{макс}}^* = 23 + 0,15Ca - 0,05Ж. \quad (\text{II-214})$$

С ростом температуры коэффициент теплопроводности теста-хлеба [в Вт/(м·К)] увеличивается, и в интервале $T = 293 \div 353$ К его можно определить по формулам [141]:

для теста-хлеба ($W^* = 16 \div 60\%$) из пшеничной муки I сорта

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,00025 (T - 273); \quad (\text{II-215})$$

для теста-хлеба ($W = 16 \div 80\%$) из ржаной муки

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,00030 (T - 273). \quad (\text{II-216})$$

При тепло- и массообмене, который соответствует реальным условиям выпечки хлеба, зависимость коэффициента теплопроводности для теста-хлеба [в Вт/(м·К)] от температуры ($T = 293 \div 343$ К) описывается формулой [139]

$$\lambda = \lambda_{293} + 0,0061 (T - 293). \quad (\text{II-217})$$

Значения $\lambda_{293} = f(\rho)$ для теста-хлеба указаны в табл. II-253.

Т а б л и ц а II-253

Коэффициент теплопроводности теста-хлеба λ [в Вт/(м·К)] [139]

Тесто-хлеб	ρ , кг/м ³	λ_{293} , Вт/(м·К)	Температура $T > 343$ К	
			353	363
Из пшеничной муки				
I сорта	470	0,35	0,42	0,50
II сорта	420	0,40	0,48	0,53
Из ржано-пшеничной муки (40%+60%)	540	0,48	0,58	0,72

Из данных табл. II-253 видно, что коэффициент теплопроводности определяется видом теста-хлеба, причем при снижении сортности муки коэффициент увеличивается. Данные этой же таблицы свидетельствуют, что при $T = 353 \div 363$ К коэффициент теплопроводности теста-хлеба заметно увеличивается. Это вызвано интенсификацией массообмена, вызванного испарением этилового спирта и других продуктов, образующихся при брожении теста.

В [53] впервые обращено внимание на то, что коэффициенты λ и α теста-хлеба зависят от плотности теплового потока на поверхности образца q (табл. II-254).

Формулы для определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теста-хлеба при нагреве без внешнего массообмена и тепловом потоке на поверхности 581—1744 Вт/м² [53]

Тесто-хлеб	W, %	λ , Вт/(м·К)	a , м²/с
Из ржаной муки	52÷54	$\lambda=0,41+$ $+0,000029q$	$a \cdot 10^8=18,8+$ $+0,0028q$
Из пшеничной муки	44,8÷45,3	$\lambda=0,30+$ $+0,000034q$	$a \cdot 10^8=19,2+$ $+0,0019q$

Таблица II-255

Коэффициенты тепло- и температуропроводности теста-хлеба при тепловом потоке на поверхности 1100—1396 Вт/м² [53]

Тесто-хлеб	W, %	Средняя температура сгорания, К	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м²/с
Из ржаной муки	52—54	328	0,44—0,49	20,8—22,8
Из пшеничной муки	44,8—45,3	338	0,32—0,37	19,7—22,2

Коэффициент температуропроводности теста-хлеба ($T=293$ К) с повышением влажности до $W^c=25\div30\%$ увеличивается, а при дальнейшем увлажнении ($W^c=100\%$) уменьшается (см. табл. II-252).

Коэффициент температуропроводности теста-хлеба (из пшеничной муки I сорта) (в м²/с) при разном содержании жира ($J=10\div20\%$) и сахара ($Ca=10\div20\%$) с повышением влажности сначала возрастает, достигая максимума, а затем снижается [141]:

при

$$0 < W^c < W_{\text{макс}}^c$$

$$a \cdot 10^8 = 2,8 + 0,005Ca - 0,02J + 0,34W^c; \quad (\text{II-218})$$

при

$$W_{\text{макс}}^c < W^c < 100\%$$

$$a \cdot 10^8 = a_{\text{макс}} - 0,5(W^c - W_{\text{макс}}^c). \quad (\text{II-219})$$

Формула (II-214) служит для определения влажности теста-хлеба, которая соответствует максимальному коэффициенту температуропроводности ($W_{\text{макс}}^c$).

Зависимость коэффициента температуропроводности (в м²/с) теста-хлеба (из ржаной муки и из пшеничной муки I сорта) от температуры можно представить единым уравнением [141]

$$a \cdot 10^8 = a_{293} + 0,027(T - 273), \quad (\text{II-220})$$

Необходимые формулы для определения коэффициента температуропроводности теста-хлеба при $T=293$ К приведены в табл. II-252.

Формулы, выражающие зависимость $a=f(q)$ для теста-хлеба, представлены в табл. II-254.

МЯКИШ И КОРКА ХЛЕБА

Коэффициент теплопроводности мякиша хлеба значительно больше, чем корки, в то время как значения коэффициента температуропроводности их различаются несущественно (табл. II-256 и II-257).

Таблица II-256

Теплофизические характеристики мякиша хлеба при $T=273 \div 291$ К

Мякиш	$\mu, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\rho_{\text{Дм}} (\text{кг/К})$	$\lambda', \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Источник
Батона из пшеничной муки I сорта	41,8	402	3190	0,298	22,3	[139]
Формового хлеба из пшеничной муки I сорта	42,5	340	2975	0,244	24,2	[139]
II сорта	45,0	500	2805	0,300	19,1	[54]
	46,3	555	—	0,25	16,7	[53]
Булки городской из пшеничной муки I сорта	45,0	346	2810	0,237	24,4	[139]
Сдобы из муки высшего сорта	42,0	358	2580	0,224	24,3	[139]
Хлеба московского заварного	41,0	254	3428	0,211	22,6	[139]
Хлеба украинского	49,8	516	2420	0,308	24,2	[139]
Хлеба рижского заварного	49,0	537	3102	0,368	22,2	[139]
	45,0	560	2857	0,335	22,2	[139]
Подового хлеба из пшеничной муки I сорта	42,5	545	2763	0,248	16,7	[54]
Хлеба из ржаной муки	55,9	687	3056	0,394	18,8	[54]
	55,6	694	—	0,400	18,7	[53]
Хлебобулочного мелкостручного изделия	—	—	—	0,233	—	[230]

Теплофизические характеристики корки хлеба [138, 54]

Корка хлеба	T, K	$W, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Украинского нового						
верхняя	377	4,0	476	1970	0,195	20,8
нижняя	383	5,0	485	1720	0,145	17,4
Паляницы из пшеничной						
муки I сорта						
верхняя	363	5,0	467	2050	0,134	14,1
нижняя	395	3,3	488	1970	0,165	26,8
Подового из муки	388	4,1	417	1710	0,175	24,7
II сорта верхняя	394	3,2	510	1640	0,195	23,3
Пшеничного из муки	—	—	420	1675	0,052	8,0
I сорта *	—	—	300	1675	0,041	8,2
Мелкоштучного изделия	273	—	—	—	0,041	22,2

* В измельченном виде.

СУХАРИ

С ростом температуры удельная теплоемкость сухих веществ хлеба [в Дж/(кг·К)] увеличивается. Совместная обработка экспериментальных данных по $c_{\text{св}} = f(T)$ для пшеничного хлеба [421, 398, 381] позволяет рекомендовать формулу, справедливую при $T = 138 \div 313 \text{ K}$:

$$c_{\text{св}} = 270 + 3,15T. \quad (\text{II-221})$$

Т а б л и ц а 11-258

Удельная теплоемкость сухих веществ теста, хлеба и сухарей

Сухие вещества	T, K	$c_{\text{св}}, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	Источник	Сухие вещества	T, K	$c_{\text{св}}, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	Источник
Пшеничного хлеба	293—	1214	[398]	Хлеба	—	1549—	[422]
	313					1674	
	273—	1175	[397]	Теста	—	1758	[230]
	313			Сухарей			
	274—	1540	[421]	ржанных	—	1507	[209]
	293			пшеничных	—	1549	[209]
	313	1256	[137]	сдобных	303	1600—	[115]
						1900	

Таблица II-259

Теплофизические характеристики сухих веществ хлеба [141]

Сухие вещества хлеба	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Ржаного	592	0,237	14,4
Из пшеничной муки			
I сорта	420	0,152	13,4
II сорта	479	0,135	12,8

Прессование сухарей (давление прессования 10 МПа) практически не оказывает влияния на зависимость $c=f(T)$ для них [115].

ТФХ сухарей «Московские» при $W=0\%$ и $T=293\div 303 \text{ К}$ равны: $c=2000 \text{ Дж/(кг·К)}$ [115]; $\lambda=0,157 \text{ Вт/(м·К)}$ и $\alpha=13,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ [141] (указанным ТФХ соответствует $\rho=599 \text{ кг/м}^3$).

При нагреве сдобных сухарей ($W=12\div 13\%$) от 303 до 413 К их удельная теплоемкость изменяется по сложному закону: в интервале 303—375 К она увеличивается [от 1500—2000 до 4500—6000 Дж/(кг·К)], а при дальнейшем повышении температуры (до 413 К) уменьшается до 2500—3500 Дж/(кг·К) [115].

Таблица II-260

Формулы для определения удельной теплоемкости сухарей ($W=0\%$) при $T=303\div 413 \text{ К}$ [115]

Сдобные сухари	Сорт муки	Содержание, %		$c, \text{Дж/(кг·К)}$
		Са	Ж	
«Школьные»	Высший	18,5	—	$c=-1592+11,4 T$
«Украинские»	»	17,0	7,0	$c=385+5,0 T$
«Киевские»	»	16,2	3,5	$c=-954+9,1 T$
«Кофейные»	»	12,5	4,0	$c=53+5,9 T$
«Московские»	Первый	12,5	4,0	$c=-484+8,2 T$
«Туристские»	»	4,5	11,0	$c=85+5,0 T$

Удельная теплоемкость некоторых видов сухарей может быть определена по формулам, приведенным в табл. II-249, а их коэффициенты λ и α — по приведенным в табл. II-252.

Для сухарей (из муки пшеничной I сорта) ТФХ при разном содержании сахара (10—20%), жира (10—20%) и влаги можно определить по следующим формулам: c — по (II-211); λ — по (II-212) и (II-213); α — по (II-218) и (II-219).

Данные табл. II-261 свидетельствуют, что при снижении влажности плотность изделий сначала увеличивается, а затем уменьшается. Объясняется такая закономерность тем, что в начальный период сушки объем уменьшается быстрее, чем масса изделия, а затем наоборот.

Плотность хлебных изделий ρ (в кг/м^3) [141]

Изделие	Влажность W^c , %								
	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Хлеб									
ржаной	645	655	660	655	645	630	615	595	570
из муки I сорта	480	495	505	510	510	500	485	465	440
из муки II сорта	590	600	605	600	590	575	560	540	520
Заготовки для сухарей									
«Московских»	—	445	455	460	465	460	440	410	390
«Сливочных»	—	465	480	487	490	480	462	440	410

Таблица II-262

Формулы для определения коэффициентов тепло- и температуропроводности заготовок сухарей [141]

Заготовки сухарей	Содержание, %		Интервал W^c , % (вычислен по формуле II-214)	λ [в $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] и a [в $\text{м}^2/\text{с}$]
	Са	Ж		
«Московских»	12,5	4	0—25	$\lambda = 0,157 + 0,007W^c$; $a \cdot 10^8 = 13,1 + 0,33W^c$
			25—100	$\lambda = 0,348 - 0,0008W^c$; $a \cdot 10^8 = 22,2 - 0,005W^c$
«Сливочных»	16,5	10	0—48	$\lambda = 0,158 + 0,007W^c$; $a \cdot 10^8 = 12,6 + 0,34W^c$
			48—100	$\lambda = 0,342 - 0,0007W^c$; $a \cdot 10^8 = 22,3 - 0,0047W^c$

При уменьшении степени пористости хлеба его коэффициенты теплопроводности [в Вт/(м·К)] и температуропроводности (в м²/с) увеличиваются [141]:

$$\lambda = \lambda_p + 0,00025 (\epsilon_n - \epsilon'_n) \quad (\text{II-222})$$

$$a = a_p + 0,01 (\epsilon_n - \epsilon'_n), \quad (\text{II-223})$$

где λ_p и a_p — значения коэффициентов при начальной степени пористости;

ϵ_p — начальная степень пористости, %; для хлеба из пшеничной муки I сорта ($W^c = 42$ и 66%) $\epsilon_n = 63 \div 65\%$, для хлеба из ржаной муки ($W^c = 78\%$) $\epsilon_n = 50\%$; ϵ'_p — изменившаяся степень пористости хлеба, %.

ТЕСТО ДЛЯ МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ. ТЕСТО — ВЫПЕЧЕННЫЕ МУЧНЫЕ КОНДИТЕРСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

Тесто для кондитерских изделий. Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] бисквитного теста ($W^c = 31\%$, $T = 293$ К) увеличивается с повышением содержания жира и уменьшением содержания сахара (опыты проводились при содержании сдобящих веществ $5-25\%$) [143]:

$$c = 2330 + 14Ж; \quad c = 2330 - 18Са. \quad (\text{II-224}); (\text{II-225})$$

Плотность теста ($W^c = 31,5\%$) для сахарного и затяжного печенья из муки I и высшего сорта с повышением содержания в нем сахара ($Са = 5 \div 40\%$) или жира ($Ж = 5 \div 25\%$), а также при одновременном внесении в тесто указанных сдобящих веществ вначале, увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается (табл. II-263).

Т а б л и ц а П-263

Плотность теста для сахарного и затяжного печенья ρ (в кг/м³) [143]

Образец	T, К	Содержание сдобящих веществ, %							
		5	10	15	20	25	30	35	40
Тесто +Са	293	1050	1110	1230	1350	1370	1350	1340	1330
Тесто +Ж	300	1150	1250	1240	1200	1175	—	—	—
Тесто + (Са + Ж)	300	1250	1300	1260	—	—	—	—	—

Этими же опытами установлено, что только при небольшой дозировке сахара и жира плотность теста зависит от давления (опыты проводились при $p = 0,5$ и $1,0$ МПа).

В другой работе этих же авторов приводятся данные по влиянию сдобящих веществ на коэффициенты теплопроводности и температуропроводности теста ($W^c = 31\%$, $T = 293 \div 300$ К) для печенья.

Результаты экспериментов (табл. II-264) свидетельствуют, что с повышением содержания сахара или жира ($W^c = \text{const}$) эти коэффициенты теста увеличиваются, достигают максимума, а затем уменьшаются.

Таблица II-264

Теплофизические характеристики теста для печенья ($W^c = \text{const}$)

ТФХ	Содержание сахара, %					Содержание жира, %			
	5	10	15	20	25	5	10	15	20
λ , Вт/(м·К)	0,302	0,348	0,402	0,430	0,410	0,335	0,400	0,380	0,345
$a \cdot 10^8$, м ² /с	12,5	14,0	15,4	15,5	15,1	12,0	13,0	12,5	11,5
c_v , кДж/(м ³ ·К)	2416	2486	2610	2774	2715	2791	3077	3040	3000
ρ , кг/м ³	1100	1220	1350	1370	1350	1150	1250	1230	1200

Коэффициент температуропроводности теста с сахаром больше, чем с жиром (при его содержании 5—20%), а коэффициент теплопроводности больше, если содержание сахара превышает 14% (табл. II-264а).

Таблица II-264а

Коэффициент теплопроводности теста для пряников и печенья при $T = 293$ К [356]

Тесто	ρ , кг/м ³	Содержание, %			λ , Вт/(м·К)
		W	Са	Ж	
Для пряников	1380	17	26—29	—	0,29
Для печенья	1230	18	25	16,0	0,31
—	—	14	19	19	0,28
—	—	16	15	14	0,26

Таблица II-265

Формулы для определения теплофизических характеристик теста [230]

Тесто	T , К	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	a , м ² /с
Сахарное	288—313	1283	$c = 2524$	$\lambda = 0,34$	$a \cdot 10^8 = 10,5$
Затяжное	288—313	1295	$c = 3902 - 5,4T$	$\lambda = 0,28 + 0,00016T$	$a \cdot 10^8 = -0,9 + 0,04T$
Галетное	288—313	1165	$c = 1231 + 5,0T$	$\lambda = -1,26 + 0,0058T$	$a \cdot 10^8 = 10,6$
Вафельное	288—333	1073	$c = 3559$	$\lambda = 0,47$	$a \cdot 10^8 = 12,3$

Теплофизические характеристики теста [230, 216]

Тесто	W, %	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
Сахарное	17,3	1206	2073	0,300	11,8
Галетное	33,1	1004	2353	0,303	12,8
Для пряников	—	1327	2856	0,408	10,4
заварное	—	1362	3181	0,429	9,9
сырцовое	—	1362	3181	0,429	9,9

Тесто — выпеченные мучные кондитерские изделия. Установлено влияние содержания сахара и жира на ТФХ теста-печенья из пшеничной муки I сорта в процессе выпечки. Тесто формовали при $p = 0,5$ МПа. ТФХ образцов теста-печенья определялись после их охлаждения до 293 К [144].

Таблица II-267

Коэффициенты тепло- и температуропроводности теста-печенья [144]

Коэффициент	Содержа- ние, %		Продолжительность выпечки, мин									
	Са	Ж	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
λ , Вт/(м·К)	10 0	0 10	0,35 0,40	0,38 0,43	0,42 0,45	0,42 0,47	0,40 0,50	0,38 0,48	0,35 0,45	0,32 0,42	0,30 0,39	
$a \cdot 10^8$, м ² /с	10 0	0 10	14,0 13,2	14,4 14,0	14,9 14,8	15,0 15,9	14,9 15,8	14,1 15,8	13,0 15,2	12,0 15,0	11,2 14,5	

Таблица II-268

Удельная теплоемкость теста-печенья c [в Дж/(кг·К)] [144]

Содбищие вещества, %		Продлжтельность выпечки, мин							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Сахар	5	2579	2828	2721	2973	2948	2989	2734	2558
	10	2365	2631	2834	2428	2470	2520	2391	2131
	15	2148	2328	2261	2114	2257	2135	2319	2165
Жир	5	2738	2839	2881	2931	2780	3006	2939	2307
	10	2658	2625	2801	2985	3061	2876	2767	3069
	15	2663	2793	2650	2843	2998	3157	3259	2931

Полученные данные (табл. II-267 и II-268) свидетельствуют, что качественное изменение ТФХ теста-печенья в процессе выпечки одинаково при разном содержании сдобящих веществ.

Т а б л и ц а II-269

Коэффициент теплопроводности теста — кондитерского изделия [356]

Образец	Содержание, %			λ [в Вт/(м·К)] при T , К				λ , Вт/(м·К) при охлаждении от 373 до 293 К
	W	Ж	Са	313	333	353	373	
Пряник	9,0	26—28	—	0,26	0,21	0,17	0,14	0,120
Печенье	4,5	25	16	0,31	0,29	0,26	0,21	0,160
	6,0	19	19	0,29	0,28	0,27	0,24	0,165
	4,5	15	14	0,26	0,26	0,25	0,21	0,140

Т а б л и ц а II-270

*Формулы для определения теплофизических характеристик
измельченных изделий [230]*

Изделие	Содержание, %			T , К	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	a , м ² /с
	W	Ж	Са					
Вафельные листы	3	—	—	288— 308	164	$c=1088+$ $+1,38T$	$\lambda=6,6+$ $+0,17T$	$a \cdot 10^8=42,7-$ $-0,078T$
Галеты «Поход»	10	—	—	288— 308	553	$c=3195-$ $-2,93T$	$\lambda=123$	$a \cdot 10^8=$ $=5,8+0,013T$
Печенье «Спорт»	7,9	21,4	9,3	298— 358	642	$c=4921-$ $-9,21T$	$\lambda=80+$ $+0,116T$	$a \cdot 10^8=-8,9+$ $+0,058T$
«Наша марка»	5,5	27,8	12,2	298— 358	705	$c=5815-$ $-12,1T$	$\lambda=128$	$a \cdot 10^8=$ $=-13,3+$ $+0,072T$

Исследования бисквитных полуфабрикатов, приготовленных из теста с $W=36\%$ и $\rho=480$ кг/м³, показали, что с ростом температуры ТФХ мякиша уменьшаются, в то время как коэффициенты λ и a корок изменяются по сложному закону (табл. II-271).

Таблица II-271

Теплофизические характеристики бисквитных полуфабрикатов [238]

Образец	ТФХ	Температура T , К			
		293	313	333	353
Верхняя корка	c_v , кДж/(м ³ ·К)	1500	1400	1400	1600
	λ , Вт/(м·К)	0,063	0,063	0,063	0,063
	$a \cdot 10^8$, м ² /с	4,2	4,5	4,5	3,9
Нижняя корка	c_v , кДж/(м ³ ·К)	1600	1500	1500	1700
	λ , Вт/(м·К)	0,10	0,11	0,12	0,13
	$a \cdot 10^8$, м ² /с	6,2	7,3	8,0	7,6
Мякиш	c_v , кДж/(м ³ ·К)	1700	1100	700	800
	λ , Вт/(м·К)	0,20	0,16	0,13	0,11
	$a \cdot 10^8$, м ² /с	11,8	14,5	14,0	10,0

Таблица II-272

Коэффициент теплопроводности пресного слоеного теста λ [в Вт/(м·К)] [4]

w^c , %	Способы термообработки		
	традиционный	комбинированный	СВЧ-нагрев
10,0	0,093	0,103	0,097
14,4	0,277	0,210	0,123
17,1	0,320	0,313	0,165
19,2	0,388	0,315	0,338
19,3	0,390	0,315	0,339

Таблица II-273

Теплофизические характеристики выпеченных изделий при $T = 288$ К [230]

Выпеченные изделия	w , %	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	α , %
Сахарные	6,16—6,66	538—658	1721	0,096	8,97	56,5
	5,33—5,67	518—550	1897	0,096	9,53	58,7
Затяжные	8,66—9,0	516	2018	0,089	8,6	57,1
	10,67—11,33	550	1972	0,102	9,6	52,5
Пряники	13,33	555	1928	0,0878	8,2	53,2
	8,33	555	1985	0,0986	9,3	61,3
Галеты «Военный поход»	10,68	478	2156	0,104	10,1	—

МАКАРОНЫ

Удельная теплоемкость сухих веществ макаронного теста составляет 1650 [229] — 1660 Дж/(кг·К) [55].

Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] макаронного теста ($T = 293$ К) в интервале влажности $W^o = 24,8 \div 43,2\%$ равна [230]:

$$c = 1650 + 15,49W^o. \quad (\text{II-226})$$

Приведенная в [230] удельная теплоемкость макарон свидетельствует, что формула (II-226) справедлива при $W^o \geq 15\%$.

Удельную теплоемкость макаронного теста [в Дж/(кг·К)] при одновременном изменении температуры ($T = 293 \div 353$ К) и влажности ($W^o = 24,8 \div 43,2\%$) рекомендуется определять по формуле [230]

$$c = -559,5 + 15,49W^o + 7,54T. \quad (\text{II-227})$$

Исследования плотности макаронного теста (из муки высшего сорта) (в кг/м³) в зависимости от влажности ($W = 28 \div 33\%$), температуры ($T = 313 \div 323$ К) и давления ($p = 2,943 \div 13,734$ МПа) показали, что температура практически не оказывает на нее влияния, а зависимость $\rho = f(W, p)$ описывается формулой [92]

$$\rho = 1175 + \left(1,29 - \frac{17,57}{W}\right) \cdot 10,2 \cdot 10^{-6} p. \quad (\text{II-228})$$

Коэффициент теплопроводности и температуропроводности макаронного теста определяется влажностью и температурой, а также тем, подвергалось ли оно предварительной гигротермообработке.

В интервале $W^o = 29 \div 44\%$ коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] и коэффициент температуропроводности (в м²/с) теста равны [229, 36].

$$\lambda = \lambda_0 + BW^o; \quad a \cdot 10^8 = a_0 + B_1 W^o. \quad (\text{II-229}); (\text{II-230})$$

Значения постоянных λ_0 , B и a_0 , B_1 приведены в табл. II-275.

ТФХ вареных макарон равны [230]: $\rho = 750$ кг/м³; $c = 3900$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,355$ Вт/(м·К) и $a = 12,3 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

КРУПА. КАШИ

Ядро крупы. Удельная теплоемкость сухих веществ ядра крупы [в Дж/(кг·К)] с ростом температуры ($T = 283 \div 313$ К) увеличивается [42]:

$$c_{сн} = c_0 + \beta_T T. \quad (\text{II-231})$$

Значения c_0 и β_T для некоторых видов ядра круп приведены в табл. II-276. В этой же таблице для сухих веществ ядра круп даны ρ , λ и a при $T = 303$ К.

Плотность сухих веществ кукурузной крупы равна 1380 кг/м³ [15].

Таблица II-274

Плотность и насыпная плотность полуфабрикатов и макаронных изделий [157]

Материал	W, %	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	
			без утиски	с утиской
Полуфабрикаты				
тесто мелкокрошковатое	29,0—30,5	1250	762	864
« среднекомковатое	29,0—31,5	1250	719	789
макароны				
«Особые»	27,0—30,5	1320	637	727
«Соломка»	28,8—29,5	1280	612	771
вермишель	28,9—29,2	1280	509	616
лапша прессованная	29,2	1280	544	673
рожки гладкие	29,4	1250	581	671
Готовые изделия				
макароны обыкновенные	10,6—12,8	1310	430	488
«Особые»	12,8—13,6	1330	411	452
«	11,8—12,1	1330	420	496
«Соломка»	12,0—13,7	1320	305	368
вермишель	10,4—13,3	1300	346	408
яичная	10,9	1190	349	410
витаминизированная	11,6	1250	369	423
фигурная	12,3	—	—	505
лапша прессованная	12,8—13,7	1300	352	433
рожки гладкие	10,9—13,5	1250	525	582
чечевица	10,8—11,6	1240	681	738
шестеренки	10,9—11,7	1200	461	501
ракушки рифленые	10,8	1250	389	422

Таблица II-275

Коэффициенты тепло- и температуропроводности теста при $W=0\%$ [229, 36]

Макаронное тесто	T, K	λ	B	α_0	B_1
Нативное	303	0,19	0,005	10,0	0,050
	313	0,21	0,005	10,3	0,050
	323	0,24	0,005	10,8	0,050
Предварительно гидро-термообработанное паром ($p=0,2$ МПа, $T=410$ K в течение 2 мин)	303	0,24	0,004	11,1	0,033
	313	0,27	0,004	11,2	0,033
	323	0,29	0,004	11,5	0,033

Теплофизические характеристики сухих веществ ядра круп [42]

Крупа	c_0 , Дж/(кг·К)	β_T	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	α , 10 ⁶ м ² /с	β_W	β	$\alpha \cdot 10^6$
Пшено шлифованное I сорта	—708	7,5	1410	0,143	6,48	25,1	0,18	8,5
Гречневая ядрица быстрорастворяющаяся I сорта	—673	6,3	1240	0,323	21,1	39,6	0,16	5,5
Рис шлифованный I сорта	—782	6,7	1400	0,346	19,8	29,3	0,37	7,6
Манная из мягкой пшеницы	—715	6,3	1370	—	—	31,0	0,16	—
Овсяная недробленая	—1221	8,0	1270	0,245	15,7	22,6	0,43	5,5
пропаренная	—	—	—	—	—	—	—	—
Перловая № I	—1414	8,4	1370	0,221	14,3	17,6	0,40	3,2

Удельная теплоемкость ядра крупы [в Дж/(кг·К)] в зависимости от влажности ($W^0=0\div 25\%$) и температуры ($T=283\div 313$ К) равна [42]:

$$c = c_0 + \beta_T T + \beta_W W^0 + \beta (T - 273). \quad (\text{II-232})$$

Значения c_0 , β_T , β_W и β ядра некоторых видов круп приведены в табл. II-276.

Таблица II-277

Плотность и коэффициент температуропроводности ядра круп при $T=303$ К [42]

Крупа *	ρ (в кг/м ³) при W^0 , %					$\alpha \cdot 10^6$ (в м ² /с) при W^0 , %				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
Пшено	1405	1397	1380	1360	1330	6,90	9,00	10,1	10,5	11,5
Гречневая	1290	1300	1285	—	—	18,0	17,0	16,3	—	—
Рис	1410	1490	1480	1450	1430	18,2	17,3	17,1	17,0	16,6
Овсяная	1300	1300	1300	1290	—	15,2	14,8	14,6	14,3	—
Перловая	1395	1430	1430	1390	1380	13,1	12,2	11,9	11,7	11,6

* Характеристики и сорта круп даны в табл. II—276.

Коэффициент теплопроводности ядра крупы [в Вт/(м·К)] при $T=303$ К (значения плотности приведены в табл. II-277) равен [42]:

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha_W W^0. \quad (\text{II-233})$$

Для некоторых видов ядра круп значения λ_0 и α_W даны в табл. II-276.

Слой крупы. Удельная теплоемкость сухих веществ слоя крупы практически не отличается от аналогичной характеристики сухих веществ ядра, поэтому зависимость $c_{0,в}=f(T)$ слоя рекомендуется определять по формуле (II-231). Необходимые для этого значения c_0 и β_T приведены в табл. II-276.

Таблица II-278

Насыпная плотность и коэффициент теплопроводности слоя крупы ($W=0\%$) при $T=303\text{ К}$ [43]

Крупа *	$d_{эк},$ мм	$\rho_{\text{я}}$ (в кг/м ³) при сложении ядер		$\lambda \cdot 10^4$ [в Вт/(м·К)] при сложении ядер		$\frac{\lambda_p}{\lambda_{\text{я}}}$	$\frac{\lambda_p}{\lambda_{\text{н}}}$
		рыхлом	плотном	рыхлом	плотном		
Овсяная	3,28	695	783	64	68	0,26	0,93
Рис	3,17	823	880	94	102	0,27	0,92
Гречневая	3,06	755	815	81	85	0,25	0,95
Перловая	2,67	810	875	80	83	0,36	0,96
Пшено	1,86	787	877	105	109	0,75	0,96
Манная	0,50	733	814	80	83	—	0,96

* Характеристики и сорта круп даны в табл. II-276.

Крупы характеризуются способностью «сопротивляться» сжатию. Поэтому значения плотности их при плотном и рыхлом сложении ядер (табл. II-278) различаются (для разных видов крупы) всего на 7,0—12,7%. Скважистость слоя крупы (в зависимости от ее вида) составляет 35,5—41,4% при плотном сложении ядер и 40,1—47,3% — при рыхлом. Поэтому крупы можно отнести к материалам, у которых теплопроводность остова (ядра) заметно влияет на этот показатель слоя. Так, при $W=0\%$ и $T=303\text{ К}$ отношение коэффициента теплопроводности слоя крупы при рыхлом сложении ядер (λ_p) к этой же характеристике ядра $\lambda_{\text{я}}$ составляет не менее 0,25. Причем с уменьшением эквивалентного диаметра $d_{эк}$ отношение $\lambda_p/\lambda_{\text{я}}$ увеличивается за счет возрастания контактной поверхности ядер.

Малое колебание коэффициента теплопроводности слоя крупы при рыхлом и плотном сложении ядер ($\lambda_p/\lambda_{\text{я}}=0,93\div 0,96$) определяется незначительным влиянием способа укладки ядер на насыпную плотность и скважистость слоя (см. табл. II-278).

Удельная теплоемкость слоя крупы практически не отличается от аналогичной характеристики ядра, поэтому зависимость $c=f(T)$ слоя рекомендуется определять по формуле (II-232). Необходимые для этого значения c_0 , β_T , β_w и β приведены в табл. II-276.

Экспериментально установлено [330], что удельная теплоемкость риса [в Дж/(кг·К)] не зависит от его состояния (рис-сырец, шелухи, крупа) и в зависимости от его влажности ($W^c=10\div 20\%$) при $T=293\text{ К}$ может быть определена по формуле [89]

$$c = 1172 + 33,5W^c. \quad (\text{II-234})$$

Плотность и насыпная плотность слоя крупы

Продукт	W, %	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	Источник
Просо рядовое	13,0	1110	728	[57]
Пшено шлифованное II сорта	13,4	1500	825	[57]
Гречиха крупяная	12,35	1134	610	[57]
Крупа гречневая	13,0	—	775	[16]
Ядрица пропаренная	13,4	1300	786	[57]
	9,6	—	830	[16]
Продел	13,2	1350	693	[57]
Крупа гречневая вареная	—	1220	825	[147]
Овес рядовой	13,6	1220	825	[147]
Крупа овсяная	11,0	—	700	[16]
Крупа овсяная недробленая I сорта	12,0	1320	769	[57]
Рис-сырец рядовой безостый	14,4	1200	495	[57]
Рис шлифованный I сорта	14,0	1430	860	[57]
	13,9	—	840	[16]
	—	1330	750	[148]
Рис шлифованный дробленый	14,0	1430	872	[57]
Ячмень рядовой	11,65	1310	715	[57]
Крупа перловая				
№ 1	11,7	1410	824	[57]
№ 3	12,2	1360	808	[57]
№ 5	11,7	1420	802	[57]
Крупа перловая варено-сушеная	13,4	—	725	[16]
Пшеница	12,9	1350	790	[57]
Крупа манная	14,0	—	690	[16]
Крупа «Полтавская»				
№ 1	12,8	1390	840	[57]
№ 2	12,7	1380	808	[57]
Крупа «Артек»	12,1	1380	734	[57]
Кукуруза зубовидная рядовая	—	—	767	[57]
Крупа кукурузная	24,7	1300	—	[118]
	8,9	1375	—	[118]
Крупа кукурузная шлифованная				
№ 1	—	—	745	[57]
№ 3	—	1380	772	[57]
№ 3	—	1380	770	[57]
Горох рядовой	15,0	1340	771	[230]
Горох лущеный полированный				
целый	13,0	1360	795	[57]
колотый	12,8	1390	825	[57]
Горох варено-сушеный	6,8	—	745	[16]

Удельная теплоемкость овсяной крупы [в Дж/(кг·К)] при тех же условиях равна [330]:

$$c = 1172 + 38,0W^c. \quad (II-235)$$

Значения удельной теплоемкости риса и овсяной крупы при $W^c = 10 \pm 20\%$ и $T = 293$ К, вычисленные соответственно по формулам (II-232), (II-234) и (II-232), (II-235), различаются менее чем на 4%.

В табл. II-279 для сравнения приведены аналогичные характеристики зерна, из которого выработаны крупы.

В процессе увлажнения риса при гидротермической обработке ($W^c = 50 \div 123\%$) его плотность (в кг/м³) уменьшается [167]:

$$\rho = 1520 - 9W^c. \quad (II-236)$$

Таблица II-280

Плотность слоя крупы ρ (в кг/м³) [120]

Крупа	Температура воды, К	Продолжительность замачивания, мин						
		0	10	20	30	40	50	60
Перловая	293	1420	1370	1350	1305	1290	1260	1250
	367	1420	1150	1130	1100	1090	1070	1050
Рисовая	293	1440	1410	1370	1290	1270	1250	1240
	367	1440	1145	1130	1100	1090	1070	1050

Таблица II-281

Плотность слоя крупы ρ (в кг/м³) при $T = 303$ К [44]

Крупа *	Влажность слоя W^c , %					
	0	5	10	15	20	25
Овсяная	1235	1280	1305	1295	1285	—
Рис	1400	1400	1500	1475	1440	1430
Гречневая	1390	1400	1456	1470	1410	—
Перловая	1415	1400	1395	1370	1330	1335
Пшено	1270	1300	1310	1280	1270	—
Манная	1380	1390	1440	1450	1380	1380

* Характеристики и сорта круп даны в табл. II-276.

Коэффициент теплопроводности слоя крупы тем больше, чем выше его влажность, температура и насыпная плотность [43, 257, 318].

Для некоторых видов круп ($W^c = 0 \div 21\%$) при охлаждении ($T = 333 \div 283$ К) коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] рекомендуется определять по формуле [43]

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha_W W^c + \alpha_T (T - 273) + \alpha_p (p_n - 800). \quad (II-237)$$

Значения λ_0 , α_W , α_T и α_p приведены в табл. II-281а.

Таблица II-281а

Коэффициенты для формулы (II-237)

Крупа	λ_0 , Вт/(м·К)	$\alpha_W \cdot 10^3$	$\alpha_T \cdot 10^3$	$\alpha_p \cdot 10^3$
Овсяная	0,0615	1,40	0,37	0,0675
Рис	0,0823	1,37	0,35	0,0590
Гречневая	0,0750	1,34	0,33	0,0580
Перловая	0,0685	1,30	0,30	0,0550
Пшено	0,0975	1,27	0,27	0,0500
Манная	0,0755	1,01	0,26	0,0340

Причем влияние вида крупы на коэффициент теплопроводности проявляется через определяющий размер: чем больше $d_{\text{жк}}$ (см. табл. II-278), тем больше α_W , α_T и α_p .

Коэффициент теплопроводности крупы при данной температуре в процессе нагрева (табл. II-282, II-283) больше, чем при охлаждении (формула II-237), причем разница в значениях тем заметнее, чем больше определяющий размер зерна ядра. Так, для риса коэффициент теплопроводности при нагреве больше на 69%, для гречневой крупы — на 50 и для пшена — на 23%.

Таблица II-282

Коэффициент теплопроводности слоя крупы в процессе нагрева λ [в Вт (м·К)] [257]

Крупа	W^c	Температура T , К				
		293	313	333	353	363
Рисовая ($\rho_n = 740$ кг/м ³ , $d_{\text{жк}} = 3,17$ мм)	15,2	0,186	0,188	0,190	0,192	0,194
	17,6	0,195	0,197	0,201	0,204	0,205
	20,8	0,208	0,211	0,218	0,224	0,226
	23,9	0,220	0,225	0,235	0,248	0,255
Гречневая ($\rho_n = 690$ кг/м ³ , $d_{\text{жк}} = 3,06$ мм)	15,1	0,157	0,159	0,161	0,164	0,165
	17,6	0,164	0,166	0,169	0,173	0,174
	20,7	0,174	0,179	0,183	0,187	0,189
	23,8	0,186	0,194	0,201	0,210	0,213
Пшено ($\rho_n = 770$ кг/м ³ , $d_{\text{жк}} = 1,86$ мм)	14,8	0,147	0,157	0,152	0,154	0,155
	17,6	0,154	0,161	0,161	0,164	0,165
	20,8	0,162	0,166	0,169	0,174	0,176
	23,8	0,174	0,179	0,183	0,189	0,191

Таблица II-283

Коэффициент теплопроводности слоя крупы λ [в Вт/(м·К)] в процессе нагрева [257]

Крупа ($W^c=17,65\%$)	ρ_n , кг/м ³	Температура T , К			
		293	313	333	353
Рисовая	690	0,191	0,195	0,197	0,201
	740	0,195	0,197	0,201	0,204
	790	0,200	0,203	0,208	0,211
	840	0,205	0,211	0,216	0,220
Гречневая	640	0,160	0,162	0,165	0,167
	690	0,164	0,166	0,169	0,173
	740	0,171	0,175	0,179	0,183
	790	0,179	0,184	0,177	0,195
Пшено	720	0,153	0,154	0,157	0,160
	770	0,154	0,157	0,161	0,164
	820	0,158	0,161	0,165	0,168
	870	0,162	0,166	0,171	0,174

Каши. Удельную теплоемкость [в Дж/(кг·К)], коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] и коэффициент температуропроводности (в м²/с) рассыпчатых каш в зависимости от температуры ($T=-278\div 358$ К) при разогреве можно определять по формулам [176]:

$$c = c_0^* + \beta_T^* T; \quad (\text{II-238})$$

$$\lambda = \lambda_0^* + \alpha_T^* T; \quad (\text{II-239})$$

$$a = a_0^* + \delta_T^* T. \quad (\text{II-240})$$

Значения постоянных, входящих в формулы, а также влажность каш, при которых эти формулы справедливы, приведены ниже.

Таблица II-283а

Коэффициенты для формул (II-238), (II-239), (II-240)

Каши	W , %	c_0^* , Дж/(кг·К)	λ_0^* , Вт/(м·К)	$a_0^* \cdot 10^3$, м ² /с	β_T^*	$\alpha_T^* \cdot 10^3$	$\delta_T^* \cdot 10^3$
Перловая	72	1630	0,164	11,48	6,15	1,21	0,69
Рисовая	70	1445	0,143	11,27	6,53	1,18	0,57
Пшеничная	66	1366	0,137	10,55	6,67	1,10	0,52
Гречневая	60	1040	0,126	11,74	6,87	1,07	0,20

Коэффициент теплопроводности каши λ [в Вт/(м·К)] [257]

Каши	Степень готовности	W, %	Температура T, К					
			293	313	333	343	353	373
Рисовая	Полуготовая Готовая Полуготовая Готовая	84	0,568	0,596	0,611	0,617	0,622	0,628
		72	0,546	0,570	0,587	0,593	0,597	0,601
		91	0,590	0,619	0,642	0,650	0,653	0,658
		86	0,571	0,597	0,612	0,618	0,623	0,626
Гречневая	Полуготовая Готовая Полуготовая Готовая	78	0,554	0,572	0,587	0,592	0,594	0,596
		60	0,532	0,544	0,553	0,557	0,558	0,559
		94	0,583	0,604	0,619	0,625	0,631	0,635
		78	0,560	0,579	0,590	0,594	0,595	0,597
Пшеничная	Полуготовая Готовая Полуготовая Готовая	81	0,559	0,582	0,600	0,606	0,609	0,612
		66	0,537	0,551	0,558	0,560	0,563	0,564
		96	0,589	0,616	0,632	0,637	0,640	0,646
		83	0,565	0,590	0,610	0,617	0,622	0,626

Значения коэффициента теплопроводности каши, вычисленные по формуле (II-239) и приведенные в табл. II-284, различаются не более чем на 11%.

Некоторые изделия из кукурузы. Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] и коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] кукурузных хлопьев [95] ($\rho_n = 128$ кг/м³, $T = 303$ К) в интервале влажности $W^c = 5 \div 30\%$ равны:

$$c = 993 + 19,44W^c; \quad (\text{II-241})$$

$$\lambda = 0,15 + 0,0028W^c. \quad (\text{II-242})$$

При $W^c = 5,3; 11,1; 25,0$ и $42,8\%$ коэффициент температуропроводности соответственно составляет $104 \cdot 10^{-8}$, $125 \cdot 10^{-8}$, $112 \cdot 10^{-8}$ и $90 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

С ростом температуры от 303 до 358 К удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] и коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] кукурузных хлопьев ($\rho_n = 155$ кг/м³, $W^c = 25\%$) равны:

$$c = -655 + 7T; \quad (\text{II-243})$$

$$\lambda = -0,12 + 0,0012T. \quad (\text{II-244})$$

При $T = 303, 323, 343$ и 353 К коэффициент температуропроводности соответственно составляет $104 \cdot 10^{-8}$, $109 \cdot 10^{-8}$, $112 \cdot 10^{-8}$ и $106 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Таблица II-285

Теплофизические характеристики порошкообразного кукурузного экстракта [231]

T, К	$\rho_{\text{н}} = 460 \text{ кг/м}^3$			$\rho_{\text{н}} = 760 \text{ кг/м}^3$		
	$c, \text{ Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	$c, \text{ Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
298	2100	0,092	9,5	2100	0,094	5,9
318	1900	0,081	9,3	1900	0,092	6,4
338	2100	0,068	7,0	2000	0,099	6,5
358	2100	0,082	8,5	2100	—	—

Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] кукурузного экстракта ($W=0 \div 5,0\%$) от температуры ($T=293 \div 363 \text{ К}$) практически не зависит и определяется по формуле [231]

$$c = 2100 + 20,9W. \quad (\text{II-245})$$

Таблица II-286

Коэффициенты тепло- и температуропроводности порошкообразного кукурузного экстракта ($\rho_{\text{н}} = 460 \text{ кг/м}^3$) [424]

T, К	$W=1,6\%$		$W=4,7\%$	
	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
298	0,101	9,0	0,112	8,0
318	0,085	6,7	0,100	6,7
338	0,063	6,3	0,075	5,0
358	0,085	8,0	0,085	6,5

8. САХАР И САХАРНЫЕ РАСТВОРЫ

САХАР

Удельная теплоемкость сахарных материалов при равной влажности и температуре практически одинакова (табл. II-287). Определяется это тем, что плотность несущественно влияет на их удельную теплоемкость.

Зависимость удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] сахара-песка ($W=0 \div 0,15\%$ и $T=293 \text{ К}$) от насыпной плотности ($\rho_{\text{н}}=700 \div 1000 \text{ кг/м}^3$) описывается формулой [38]

$$c = 1080 - 0,126\rho_{\text{н}}. \quad (\text{II-246})$$

Удельная теплоемкость сахарных материалов ($W=0\div0,2\%$)
при $T=293\text{ К}$

Материал	c , Дж/(кг·К)	Источник	Материал	c , Дж/(кг·К)	Источник
Монокристалл сахарозы	1256—1467	[389, 39]	Сахарная пудра	1290—1256	[260, 230]
Сахар-рафинад	1237	[122]	Сахарная пыль	1125—1214	[164]
Сахар-песок	1234—1296	[262, 260, 230, 51, 383, 182]	Сухие вещества сахара	1231	[55]

Удельную теплоемкость сахарных материалов [в Дж/(кг·К)] как двухкомпонентную систему сахар—воздух рекомендуется рассчитывать по формуле аддитивности, которая при $T=293\text{ К}$ имеет вид

$$c = 1005 + 0,159\rho', \quad (\text{II-247})$$

где ρ' — плотность или насыпная плотность сахарного материала, кг/м^3 .

Из формулы (II-247) следует, что удельная теплоемкость монокристалла сахарозы ($\rho=1568\div1595\text{ кг/м}^3$) и сахарной пыли ($458\div574\text{ кг/м}^3$) различается не более чем на $3,6\%$.

Энтальпию сахарных материалов (в Дж/кг) в интервале $273\div413\text{ К}$ рекомендуется определять по формуле [213].

$$i = (604 + 2T) \cdot (T - 273). \quad (\text{II-248})$$

Энтальпия сахарных материалов, вычисленная по формуле (II-248) и приведенная в литературе [295, 293], различается несущественно.

Молярная теплоемкость [в Дж/(моль·К)] твердой сахарозы c_m при $T=298\div363\text{ К}$ равна [230]:

$$c_m = 425818 + 1650(T - 298) + 2,14(T - 298)^2. \quad (\text{II-249})$$

В соответствии с формулой (II-249) удельная теплоемкость сахарных материалов [в Дж/(кг·К)] может быть определена по формуле

$$c = 1245 + 4,82(T - 298) + 0,006(T - 298)^2. \quad (\text{II-250})$$

Значения удельной теплоемкости сахарных материалов в зависимости от температуры, которые вычислены по формулам разных авторов [230, 55, 267, 296, 293, 184], различаются между собой до 40% при $T=273\text{ К}$ и до 26% при $T=373\text{ К}$. Совместный анализ указанных формул свидетельствует, что удельную теплоемкость сахарных материалов [в Дж/(кг·К)] в интервале $273\div373\text{ К}$ целесообразно определять по формуле [230]

$$c = 190 + 3,56T. \quad (\text{II-251})$$

При повышении влажности сахарных материалов от 0,023 до 3,7% их удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] равна [223]:

$$c = 1336 + 28,4W. \quad (II-252)$$

Зависимость удельной теплоемкости сахарных материалов [в Дж/(кг·К)] от T и W ($W=0÷4\%$) описывается формулой [51]

$$c = -967 + 29,3W + 7,2T. \quad (II-253)$$

Удельная теплоемкость аморфного сахара [в Дж/(кг·К)] при $T=295÷298$ К равна [293]:

$$c = 176 + 4,19T. \quad (II-254)$$

Монокристалл сахарозы. Плотность монокристалла сахарозы (в кг/м³) в интервале $T=293÷353$ К равна [93]:

$$\rho = 1784 - 0,737T. \quad (II-255)$$

Т а б л и ц а II-288

Теплофизические характеристики сахарных материалов
при $T=273÷293$ К

Материал	ρ или ρ_m , кг/м³	Источник	λ , Вт/(м·К)	Источник	$\alpha \cdot 10^6$, м²/с	Источ- ник
Монокристалл сахарозы	1568— 1595	[184, 93, 51, 192, 305]	0,58	[261, 39, 188, 192]	24,4— 28,5	[261, 38, 187]
Сахар-рафинад	1164— 1271	[187, 184]	0,41	Расчет	27,5	[184]
Сахар-песок при свобод- ной уклад- ке	551— 938	[51, 164]	0,12 ($\rho_m=850$ кг/м³)	[139, 230, 164, 223, 184]	12,1 ($\rho_m=850$ кг/м³)	[164]
при плот- ной уклад- ке	1050— 110	[51]	0,14 ($\rho_m=831$ кг/м³)		13,5 ($\rho_m=831$ кг/м³)	[230]
Сахарная пудра	450— 870	[230— 164]	0,133 ($\rho_m=871$ кг/м³)	[230, 228]	13,1 ($\rho_m=871$ кг/м³)	[230]
Сахарная пыль	458— 574	[164]	0,035— 0,065	[164]	9,6—10,6	[164]

Из формулы (II-255) следует, что коэффициент объемного теплового расширения монокристалла сахарозы составляет $0,48 \cdot 10^{-3}$, а не $0,11 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, как это указывают некоторые авторы [187, 268].

Температурные изменения коэффициента теплопроводности монокристалла сахарозы [в Вт/(м·К)] в соответствии с данными по изменению его c , ρ и α в зависимости от температуры (формулы II-251, II-255, II-257) могут быть описаны следующей формулой:

$$\lambda = 0,93 - 0,0015T. \quad (II-256)$$

Формула (II-256) отличается от рекомендованной в [187], так как в указанной работе при определении $\rho=f(T)$ монокристалла сахарозы использовалось значение $\beta=0,11 \cdot 10^{-3}$, а не $0,48 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Коэффициент температуропроводности монокристалла сахарозы (в $\text{м}^2/\text{с}$) в интервале температур $293 \div 373 \text{ K}$ равен [187]:

$$\alpha \cdot 10^8 = 65,9 - 0,137T. \quad (\text{II-257})$$

Приведенный в [260] коэффициент температурспроводности монокристалла сахарозы ($13,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$) меньше его действительного значения.

Сахар-рафинад. ТФХ сахара-рафинада при $T=290 \text{ K}$ даны в табл. II-288.

С повышением температуры сахара-рафинада ($\rho=1230 \text{ кг/м}^3$) от 290 до 343 K его объемная теплоемкость возрастает в $1,17$ раза, а коэффициент температуропроводности уменьшается в $1,14$ раза, поэтому его коэффициент теплопроводности практически не изменяется (табл. II-289).

Т а б л и ц а II-289

Теплофизические характеристики сахара-рафинада

$T, \text{ K}$	$c_V \cdot 10^{-3},$ $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$
343	1753	24,2	0,423
290	1503	27,5	0,412

Сахар-песок. Насыпная плотность сахара-песка изменяется в широком интервале (см. табл. II-288). При повышении влажности сахара-песка от $0,023$ до $3,7\%$ его насыпная плотность (в кг/м^3) при $T=293 \text{ K}$ увеличивается [229]:

$$\rho_n = 990 + 27,0W. \quad (\text{II-258})$$

Размеры кристаллов сахара-песка от $0,25$ до $2,00 \text{ мм}$ не оказывают влияния на его насыпную плотность [164].

Коэффициент теплопроводности и температуропроводности сахара-песка, как и других зернистых материалов, зависит не только от ρ и T , но и от формы и размеров пор слоя, формы и размеров кристаллов, а также способа их укладки. Об этом косвенно свидетельствуют значения указанных характеристик сахара-песка ($T=293 \text{ K}$), полученные одним и тем же методом (табл. II-290).

Т а б л и ц а II-290

Теплофизические характеристики сахара-песка [164]

$\rho_n, \text{ кг/м}^3$	$W, \%$	Количество опытов	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$		$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	
			предельные значения	среднее	предельные значения	среднее
793—810	0,03—0,09	6	0,085—0,160	0,114	9,4—12,3	11,3
845—862	0,04—0,06	5	0,116—0,137	0,123	10,3—14,2	12,2
890—910	0,02—0,06	8	0,114—0,174	0,134	10,3—14,1	12,7

При одновременном повышении влажности ($W=0,023\div 3,7\%$) и насыпной плотности (формула II-258) коэффициенты теплопроводности [в Вт/(м·К)] и температуропроводности (в м²/с) сахара-песка равны [223]:

$$\lambda = 0,15 + 0,00377W; a \cdot 10^8 = 9,5 + 2,25W.$$

(II-259); (II-260)

Совместная обработка экспериментальных данных по теплопроводности сахарных материалов [в Вт/(м·К)] при различной плотности [216, 223, 219, 230, 184, 192]

Таблица II-291

Коэффициенты тепло- и температуропроводности сахара-песка ($\rho=836 \text{ кг/м}^3$) [164]

W, %	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
0,05	0,11	11,8
0,51	0,16	14,7
0,79	0,23	16,2

позволила предложить формулу, которая справедлива для сахара-песка при $\rho=800\div 1000 \text{ кг/м}^3$ и $T=293 \text{ К}$ [87]

$$\lambda = 0,105 + 0,593 \cdot 10^{-3} (\rho - 800). \quad (\text{II-261})$$

В интервале $T=268\div 308 \text{ К}$ коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] сахара-песка ($\rho=-831 \text{ кг/м}^3$, $W=0,15\%$) уменьшается [230]:

$$\lambda = 0,249 - 0,000357. \quad (\text{II-262})$$

Экспериментальное значение коэффициента теплопроводности сахара-песка ($\rho=928 \text{ кг/м}^3$ и $T=293 \text{ К}$) [184] и вычисленное по формуле (II-262) различаются незначительно. При более высокой температуре ($T=293\div 373 \text{ К}$) коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] сахара-песка ($\rho=658 \text{ кг/м}^3$) увеличивается по формуле [59]

$$\lambda = 0,005 + 0,00054T. \quad (\text{II-263})$$

Для сахара-песка ($T=293 \text{ К}$) в интервале $\rho=800\div 1000 \text{ кг/м}^3$ в соответствии с формулами (II-246 и II-261) для коэффициента температуропроводности (в м²/с) справедлива формула

$$a \cdot 10^8 = 0,0228 \rho - 6,0. \quad (\text{II-264})$$

Теплофизические характеристики сахарной пудры и сахарной пыли приведены в табл. II-288.

Значительное число экспериментальных данных по коэффициенту теплопроводности различных сахарных материалов при $T=273\div 293 \text{ К}$ (см. табл. II-288) позволяет надежнее отразить ход их теплопроводности [в Вт/(м·К)] в зависимости от скважистости слоя:

$$\text{при } 0 < \epsilon_c < 50\% \quad \lambda = 0,58 - 0,0096\epsilon_c; \quad (\text{II-265})$$

$$\text{при } \epsilon_c > 50\% \quad \lambda = 0,17 - 0,0015\epsilon_c. \quad (\text{II-266})$$

Формулы (II-265 и II-266) свидетельствуют, что если в сахарном материале содержится мало воздуха ($\epsilon_c < 50\%$), всякое увеличение его содержания приводит к заметному уменьшению коэффициента теплопроводности, а после того как большинство частиц

сахарного материала разделено воздушными прослойками ($\epsilon_c > 50\%$), увеличение содержания воздуха сказывается на теплопроводности в значительно меньшей степени.

В соответствии с формулами (II-265 и II-266) зависимость коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] от плотности для сахарных материалов может быть представлена формулами:

$$\text{при } 790 < (\rho \text{ или } \rho_n) < 1580 \text{ кг/м}^3 \quad \lambda = -0,38 + 0,0006068\rho; \quad (\text{II-267})$$

$$\text{при } \rho_n < 790 \text{ кг/м}^3 \quad \lambda = 0,026 + 0,0000936\rho_n. \quad (\text{II-268})$$

Формулы (II-247 и II-265—II-268) позволили рассчитать коэффициент температуропроводности сахарного материала в зависимости от скажистости слоя и насыпной плотности (табл. II-292).

Таблица II-292

Плотность и температуропроводность сахарных материалов

ТФХ	Скажистость слоя ϵ_c , %				
	0	25	50	60	75
ρ или ρ_n , кг/м ³	1582	1193	791	632	398
$a \cdot 10^8$, м ² /с	28,9	23,9	11,1	12,2	13,6

Приведенные в табл. II-292 данные свидетельствуют, что если в сахарном материале воздуха содержится мало ($\epsilon_c < 50\%$), всякое увеличение его содержания приводит к заметному уменьшению коэффициента температуропроводности, а после того как большинство частиц сахарного материала разделено воздушными прослойками ($\epsilon_c > 50\%$), коэффициент температуропроводности увеличивается.

Тростниковый сахар-сырец. В литературе приводится мало данных о ТФХ тростникового сахара-сырца.

Таблица II-293

Теплофизические характеристики тростникового сахара-сырца ($W=0,4\%$) при $T=304 \text{ K}$ [219]

ρ_n , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
600	1249	0,30	40,1
700	1132	0,37	47,2
800	1025	0,40	49,3
900	878	0,43	55,0
1000	1029	0,58	56,6

Жом. ТФХ сухих веществ жом равны [168]: $c=828$ Дж/(кг·К);
 $\rho=1281$ кг/м³; $\lambda=0,349$ Вт/(м·К) и $a \cdot 10^8=32,9$ м²/с.

Т а б л и ц а II-294

Формулы для определения теплофизических характеристик жома [168]

W, %	c, Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с
0—75 75—85,7	$c=828+105,9\Pi^*$ $c=-343+376,7\Pi^*$	$\lambda=34,9+7,26\Pi^*$ $\lambda=68,3-4,21\Pi^*$	$a=33+5\Pi^*$ $a=68,3-7,6\Pi^*$

$$*\Pi = \frac{W}{100-W}.$$

В интервале $T=293 \div 353$ К ТФК жома ($W=5,66\%$) рекомендовано определять по формулам [168]:

$$c = -140 + 4,08T; \quad (\text{II-269})$$

$$\lambda = -1,176 + 0,0056T; \quad (\text{II-270})$$

$$a \cdot 10^8 = -41,2 + 0,27T, \quad (\text{II-271})$$

где c выражена в Дж/(кг·К), λ — в Вт/(м·К) и a — в м²/с.

САХАРНЫЕ РАСТВОРЫ

Удельная теплоемкость сахарных растворов [в Дж/(кг·К)] определялась по разным методикам [184, 317]. Полученные результаты подтвердили надежность формулы, которая справедлива при $T=293 \div 353$ К и $n=10 \div 75\%$ [184]:

$$c = 4187 - 25,12n + 0,07537(T - 273)n. \quad (\text{II-272})$$

Энтальпия сахарного раствора (в Дж/кг) в интервале 273—413 К равна [213]:

$$i = [4187 - 4,187n(8,457 - 0,009T)](T - 273). \quad (\text{II-273})$$

Энтальпия сахарного раствора (в Дж/кг) в зависимости от температуры ($T=293 \div 313$ К) равна [360]:

$$\text{при } n = 50\% \quad i = 3140(T - 273); \quad (\text{II-274})$$

$$\text{при } n = 60\% \quad i = 2617(T - 273). \quad (\text{II-275})$$

Значения энтальпии сахарных растворов, вычисленные по формулам (II-273—II-275), различаются не более чем на 6%.

Коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость сахарных растворов при температуре кипения [216]

Характеристика	Концентрация раствора, %					
	10	20	30	40	50	60
Температура кипения, К	373,2	373,4	373,7	374,2	375,0	376,5
λ , Вт/(м·К)	0,645	0,642	0,570	0,531	0,493	0,456
c , Дж/(кг·К)	4120	3864	3626	3358	3256	2939

Определить плотность сахарных растворов по формуле аддитивности (используя долю массы) не представляется возможным, так как объем сахарного раствора (при данных концентрации и температуре) не равен сумме объемов его компонентов. Так, по данным [305], действительный удельный объем монокристалла сахарозы при $T=293$ К составляет 0,630 мл/г, в то время как расчетное значение его в сахарном растворе 0,644 мл/г. Поэтому зависимость $\rho=f(n, T)$ сахарных растворов обычно представляется в виде таблиц [220, 305, 192, 302, 52, 411, 216] или графиков [378, 212, 51, 184] и значительно реже формулами. Плотность (в кг/м³) сахарного раствора равна [302]:

$$\rho_{20}^{20} = 1000 + 3,8441n + 0,01441n^2 + 0,0000399n^3. \quad (\text{II-276})$$

В интервале 283—303 К плотность (в кг/м³) сахарного раствора можно определить по формуле [302]

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \beta(t_0 - t_t)], \quad (\text{II-277})$$

$$\text{где } \beta \cdot 10^3 = 0,291 + 0,0037(n - 23,7) + 0,0066(T - 293) + 0,00019(n - 23,7) \cdot (T - 293). \quad (\text{II-278})$$

Плотность сахарных растворов (в кг/м³) в соответствии с данными [305] можно определить по формулам:

$$\text{при } 5 < n < 50\% \quad \rho_{20}^{20} = 996 + 4,7196n; \quad (\text{II-279})$$

$$\text{при } 50 < n < 95\% \quad \rho_{20}^{20} = 913 + 6,3722n. \quad (\text{II-280})$$

Предложена формула для определения плотности сахарных растворов (в кг/м³) с учетом изменения объема сахарозы в растворе:

$$\rho = \rho_n + (0,0062n + 0,00003n^2)(\rho_1 - \rho_n), \quad (\text{II-281})$$

где ρ_n — плотность воды при температуре сахарного раствора;

ρ_1 — плотность сахарозы при температуре сахарного раствора.

Плотность сахарного раствора (в кг/м³) рекомендовано определять с учетом величины сжатия сахарозы при растворении [110]:

$$\frac{1}{\rho_{20}^{20}} = 1,09177 - 3,872 \cdot 10^{-3}n + 1,92 \cdot 10^{-6}n^2 - 0,44 \cdot 10^{-8}n^3 + \\ + 1,43 \cdot 10^{-10}n^4. \quad (\text{II-282})$$

Выведена формула для определения плотности сахарного раствора с использованием схемы решения задачи по нахождению плотности гидрофильного золя. При малых значениях концентрации сахарозы в растворе ($n < 60\%$) плотность (в кг/м³) его равна [249]:

$$\rho = \frac{\rho_n}{1 - 0,0038513n}. \quad (\text{II-283})$$

Значения плотности сахарных растворов, полученные экспериментально и вычисленные по формулам (II-276 и II-279—II-283), максимально различаются на 1%.

Плотность сахарных растворов можно определять по формуле аддитивности (используя долю массы), но в этом случае вместо действительной плотности монокристалла сахарозы следует учесть видимую его плотность в растворе ($\rho_{с.р.}$).

Экспериментальные значения плотности сахарных растворов в широком интервале n и T (табл. II-296) позволили нам определить видимую плотность монокристалла сахарозы (в кг/м³) в растворе. При $n = 10 \div 70\%$ и $T = 283 \div 363$ К

$$\rho_{с.р.} = 1579 - 0,671T + 1,649n. \quad (\text{II-284})$$

Т а б л и ц а II-296

Использование работы по плотности сахарных растворов

$n, \%$	$T, \text{ К}$	Источник	$n, \%$	$T, \text{ К}$	Источник
1—69	283—376	[411]	69—81	313—368	[302]
1—70	273—333	[192]	5—95	293	[305]
76—82	343—363	[52]	5—20	273—343	[220]
5—50	273—323	[249]			

Коэффициент теплопроводности сахарных растворов исследован в широких интервалах температуры и концентраций (табл. II-297).

Зависимость $\lambda = f(T, n)$ сахарных растворов в литературе представлена в виде таблиц [346, 260], графиков [188, 184] и формул [230, 184, 251].

Коэффициент теплопроводности сахарных растворов ($T = 283$ К и $n = 10 \div 60\%$) рекомендуется рассчитывать по формуле [230]

$$\lambda = [486 + 1,55(T - 273) - 0,005(T - 273)^2] (1 - 0,0054n) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{II-285})$$

Работы по коэффициенту теплопроводности сахарных растворов

Т, К	п, %	Источник	Т, К	п, %	Источник
296—343	13—65	[184]	323—373	10—30	[346]
296—343	20—0	[260]	303—363	10—85	[188]
283—353	10—60	[230]	303—368	26—86	[184]

Универсальная формула (1) во введении и данные по плотности и коэффициенту теплопроводности сахарных растворов (табл. II-297) позволяют выразить температурный ход коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] сахарных растворов ($T=283\div353$ К и $n=10\div60\%$) в следующем виде:

$$\text{при } 10 < n < 30\% \quad \lambda = \frac{0,692 - 0,005875n}{1000\alpha} \rho_{\text{ср}}; \quad (\text{II-286})$$

$$\text{при } 30 < n < 60\% \quad \lambda = \frac{0,665 - 0,00498n}{1000\alpha} \rho_{\text{ср}}. \quad (\text{II-287})$$

Необходимые значения плотности сахарного раствора следует рассчитывать по формуле аддитивности, используя ρ_0, ρ (формула II-284).

Постоянство констант B сахарных растворов в интервале 283—353 К (формулы II-286, II-287) свидетельствует, что молекулы воды сохраняют способность к ассоциации и в насыщенных сахарных растворах, причем до $T=353$ К степень ассоциации такая же, как и для чистой воды.

Для концентрированных сахарных растворов при $70 < n < 85\%$ для коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] справедливы формулы [188]:

$$\text{при } T < 343 \text{ К } \lambda = 0,264 (T - 273)^{0,093} \cdot 10^{0,29 (0,49 - n)}; \quad (\text{II-288})$$

$$\text{при } 343 < T < 367 \text{ К } \lambda = 0,0858 (0,744 - n^{0,5}) (T - 273)^{1,5} + 0,449. \quad (\text{II-289})$$

Коэффициент температуропроводности сахарных растворов (в м²/с) рекомендуется определять по формулам [188]:

$$\text{при } T < 343 \text{ К } a \cdot 10^8 = 8,0 (T - 273)^{0,07} \cdot 10^m (0,49 - n), \quad (\text{II-290})$$

где $m=0,30$ при $n=20\div70\%$; $m=0,22$ при $n=70\div85\%$;

$$\text{при } 343 < T < 364 \text{ и } n = 60 - 85\% \quad a \cdot 10^8 = 1,89 (0,707 - n^{0,5}) \times \\ \times (T - 273)^{0,5} + 12,6. \quad (\text{II-291})$$

График зависимости $a=f(T, n)$ сахарных растворов в интервале $T=303\div403$ К и $n=0\div90\%$ приведен в [184].

9. КРАХМАЛ. САХАРИСТЫЕ ПРОДУКТЫ. ДРОЖЖИ

КРАХМАЛ

Удельная теплоемкость сухих веществ крахмалов зависит от их вида (табл. II-298).

Таблица II-298

Удельная теплоемкость сухих веществ крахмала

Крахмал	T, K	$c_{св}, Дж/(кг \cdot K)$	Источник
Картофельный	293	1215	[53]
	293	1256	[372]
Зерновой	293—298	1842—1926	[389]
Сорго	293—298	1759—1884	[389]
Рисовый	263—293	1130	[400]
Пшеничный	293	1790	[422]
	293—298	1969—2010	[389]

Обработка экспериментальных данных [372, 230, 342, 400] позволила рекомендовать формулу для определения удельной теплоемкости картофельного и рисового крахмалов [в Дж/(кг·К)] в интервале 273—333 К [69]:

$$c_{св} = 158 + 3,56T. \quad (II-292)$$

Для сухих веществ нативного и клейстеризованного крахмалов значения их $c_{св}$ при одной и той же температуре одинаковы [230].

С повышением температуры (выше 273 К) и с ее понижением (ниже 273 К) коэффициенты теплопроводности и температуропроводности сухих веществ картофельного крахмала увеличиваются (табл. II-299).

При $T=298$ и 243 К коэффициент теплопроводности сухих веществ крахмала (плотность не указана) соответственно равен 0,139 и 0,100 Вт/(м·К) [96].

Таблица II-299

Коэффициенты тепло- и температуропроводности сухих веществ картофельного крахмала ($\rho_{п}=650 \text{ кг/м}^3$) [97, 29]

ТФХ	Температура T, K					
	243	253	263	293	313	333
$\lambda_{св}, Вт/(м \cdot K)$	0,110	0,109	0,100	0,115	0,120	0,125
$\alpha_{св} \cdot 10^8, м^2/с$	14,0	12,7	12,0	9,9	10,0	10,1

С повышением температуры (опыты проводились в интервале 273—320 К) геля сухих веществ картофельного крахмала, полученного сублимационной сушкой, его коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] увеличивается [407]:

$$\lambda_{св} = 0,008 + 0,000099T. \quad (II-293)$$

С возрастанием давления коэффициент теплопроводности геля сухих веществ картофельного крахмала, полученного сублимационной сушкой, возрастает (табл. II-300) особенно заметно в интервале давлений 1,33—13,3 кПа

Т а б л и ц а II-300

Коэффициент теплопроводности сухих веществ картофельного крахмала при $T=314$ К [407]

p , кПа	0,013	0,13	1,33	13,3	101,3	133,3
$\lambda_{св} \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	0,9	1,4	2,9	3,7	3,9	4,0

В [407] сопоставлен коэффициент теплопроводности геля сухих веществ картофельного крахмала, полученного сублимационной сушкой в вакууме, воздухе, азоте и гелии. При $T=314$ К указанный коэффициент оказался равен соответственно 0,0090; 0,0039; 0,0038 и 0,0080 Вт/(м·К). Авторы работы сделали вывод, что чем выше теплопроводность среды, в которой находится крахмал, тем больше коэффициент теплопроводности его сухих веществ.

Удельная теплоемкость нативного и клейстеризованного крахмалов (при одинаковых W и T) практически не различается [53].

Т а б л и ц а II-301

Формулы для определения удельной теплоемкости крахмала

Крахмал	T , К	W , %	c , Дж/(кг·К)	Источ-ник
Картофельный нативный	293	1,2—14,6	$c = 1215 + 29,7 W$	[53]
Клейстеризованный	293	0,3—13,4	$c = 1230 + 29,5 W$	[53]
	293	0—30	$c = 1256 + 35,4 W$	[372]
Картофельный	293	30—50	$c = 1633 + 25,5 W$	[372]
Рисовый	263—293	0—11,8	$c = 1130 + 30,15 W$	[400]

Уменьшение углового коэффициента в формуле $c=f(W)$ для картофельного крахмала при влажности более 30% (табл. II-301) вызвано изменением характера связи влаги в нем.

Для пшеничного и рисового крахмала удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] равна [397]:

при $W=11,5\div 11,9\%$ в интервале 233—273 К 1256;

при $W=11,5\div 11,9\%$ в интервале 273—313 К 1632;

при $W=24,7\div 25,2\%$ в интервале 273—313 К 2303.

Совместная обработка экспериментальных данных по удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] картофельного крахмала (табл. II-301 и II-302) позволила рекомендовать следующие формулы, которые справедливы при $T=273\div 313$ К [69]:

Таблица II-302

Формулы для определения удельной теплоемкости крахмала

W, %	T, К	c, Дж/(кг·К)	Источник
—	283—323	$c=380+2,9 T$	[260]
20	273—313	$c=-550+8,79 T$	[372]
Пропитанный водой	273—303	$c=-1476+10,47 T$	[342]
—	273—333	$c=50+4,88 T$	[435]

$$\text{при } 0 < W < 30\% \quad c = 1172 + 36,4W + 5,0(T - 273) + \\ + 0,05W(T - 273); \quad (\text{II-294})$$

$$\text{при } 30 < W < 50\% \quad c = 1465 + 27,2W + 8,4(T - 273) + \\ + 0,08W(T - 273). \quad (\text{II-295})$$

Из формул (II-294 и II-295) видно, что влажность, как и следовало ожидать, оказывает на c более существенное влияние, чем температура.

Удельная теплоемкость крахмалов при комнатной температуре равна: кукурузного ($W=11,7\%$) — 1308 Дж/(кг·К) [139], ($W=13\%$) — 1771 [260], пшеничного — 1842 [422], растворимого ($W=9\%$) — 1123 Дж/(кг·К).

Температурный коэффициент объемного расширения крахмала равен $0,32 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при $T=288\div 290$ К и $0,39 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при $T=296\div 298$ К [342].

По данным [435], этот коэффициент при 293 К составляет $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. При ионизирующем облучении плотность крахмала уменьшается. Так, плотность крахмала из пакистанского риса равна $1512\div 1511$, а после облучения 1494—1499 кг/м³ [308].

Коэффициент теплопроводности крахмала в зависимости от влажности и температуры изучен недостаточно.

Проведенная совместная обработка данных по коэффициенту теплопроводности [в Вт/(м·К)] крахмала при $T=293$ К [97, 216, 87, 139, 103] позволила предложить следующую формулу, справедливую при $W=0\div 45\%$ [69]:

$$\lambda = 0,145 + 0,0020W. \quad (\text{II-296})$$

Плотность и насыпная плотность крахмала

Вид крахмала	W, %	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	Источник
Картофельный	0	1648	—	[435]
	13—20	1648	650	[216]
Кукурузный	0	1620	—	[342]
	13—20	1623	550	[216]
Ячменный	11	—	596	[139]
	13,8	—	515	[161]
	—	1526	—	[342]
	—	1144	—	[342]
Пшеничный	11,4—12,7	1827—1820	—	[194]
	0	1629	671	[435]
	Пропитанный водой	—	618	[342]
	—	1458	—	[230]
Рисовый	—	1600	—	[104]
	0	1620	—	[216]
	—	1494	—	[308]
Ржаной	0	1620	—	[435]
Солодовый	12,4—12,7	1803—1818	—	[194]

Значения коэффициента теплопроводности крахмала, которые вычислены по формуле (II-296) и приведены в табл. II-304, различаются не более чем на 2,2%.

Таблица II-304

Коэффициент теплопроводности картофельного крахмала
 λ [в Вт/(м К)] [97]

t, К	Влажность W, %		
	30	40	50
293	0,20	0,230	0,244
313	0,21	0,232	0,242
333	0,22	0,235	0,250

Обращено внимание [147], что в литературе встречаются противоречивые мнения о качественном влиянии влажности на коэффициент температуропроводности крахмала. Так, по данным [103], этот коэффициент при небольшом увлажнении возрастает, а при повышении влажности уменьшается, в то время как в других работах [97, 87] установлено, что с ростом влажности крахмала до 40—50% этот коэффициент увеличивается.

Коэффициент температуропроводности крахмала при $W > 30\%$ и $T = 273 \div 373$ К рекомендуется рассчитывать по универсальной формуле (7) во введении. Значения коэффициента температуропроводности крахмала ($W = 30, 40$ и 50% и $T = 293, 313$ и 333 К), рассчитанные по универсальной формуле и экспериментальные [97], различаются менее чем на 4%.

Методом экстраполяции данных по жидкой суспензии крахмала в амилозе получен коэффициент теплопроводности его монолитной гранулы. При $W = 10\%$ и $T = 298$ К он равен $0,216$ Вт/(м·К) [403]. Таким образом, другие теплофизические характеристики монолитной гранулы крахмала (при указанных условиях) равны:

удельная теплоемкость (по формуле II-294) 1673 Дж/(кг·К);

плотность (в соответствии с данными табл. II-303) 1550 кг/м³;

коэффициент температуропроводности $8,33 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Коэффициент теплопроводности монолитной гранулы крахмала, как и следовало ожидать, больше, а коэффициент температуропроводности монолитной гранулы меньше, чем слоя крахмала. Определяется это различием их объемной теплоемкости: для монолитной гранулы — 2590 , для слоя крахмала — 1000 кДж/(м³·К).

ПАТОКА

Удельная теплоемкость сухих веществ патоки [в Дж/(кг·К)] в интервале $273—373$ К равна [107]:

$$c = -427 + 6,82T. \quad (\text{II-297})$$

Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] патоки ($n = 78,15\%$) в интервале $293—353$ К определяется по формуле [260]

$$c = 252,9 + 5,44T. \quad (\text{II-298})$$

В интервале $n = 30 \div 60\%$ удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] паточных растворов (доброкачественность $40,6—42,0\%$) при комнатной температуре равна [7]:

$$c = 4233 - 25,4n. \quad (\text{II-299})$$

Использование формул (II-297—II-299) и правила аддитивности позволяет рекомендовать следующую формулу для определения удельной теплоемкости [в Дж/(кг·К)] патоки и паточных растворов ($n = 0 \div 100\%$) в интервале $293—353$ К:

$$c = 4187 - 46,14n + (0,0687n - 0,05)T. \quad (\text{II-300})$$

Данные [230] о том, что удельная теплоемкость патоки ($n = 77,9\%$) с ростом температуры уменьшается, ошибочны.

Формулы для расчета плотности растворов патоки (в кг/м³) в интервале $293—373$ К имеют вид [107]:

$$\text{при } n = 30\% \quad \rho = 1316 - 0,575T; \quad (\text{II-301})$$

$$\text{при } n = 40\% \quad \rho = 1347 - 0,563T; \quad (\text{II-302})$$

$$\text{при } n = 50\% \quad \rho = 1391 - 0,550T; \quad (\text{II-303})$$

$$\text{при } n = 60\% \quad \rho = 1441 - 0,55T. \quad (\text{II-304})$$

Плотность паточных растворов болгарского производства (в кг/м³) в интервале $n=10\div 80\%$ и $T=293\div 363$ К определяется по формуле [152]

$$\rho = 1173 + 4,64n - 0,589T. \quad (\text{II-305})$$

Зависимость плотности патоки (в кг/м³) от температуры выражается формулами:

$$\text{при } n = 77,9\% \text{ и } T = 288 \div 348 \text{ К } \rho = 1596 - 0,555T; \quad (\text{II-306})$$

$$\text{при } n = 78,5\% \text{ и } T = 273 \div 353 \text{ К } \rho = 1673 - T. \quad (\text{II-307})$$

Коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] патоки ($n=77,9\div 78,5\%$) несущественно зависит от температуры. Об этом свидетельствуют следующие экспериментальные данные.

Таблица II-305

Плотность патоки при $T=293$ К [230]

Патока	$n, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Вареная	15,1	1460
Крахмальная	20,0	1430
Мальтозная	18,4	1430

В интервале $T=288\div 348$ К [230]

$$\lambda = 0,328 + 0,000116T; \quad (\text{II-308})$$

В интервале $T=273\div 353$ К [260]

$$\lambda = 0,302 = \text{const.} \quad (\text{II-309})$$

Различие в формулах (II-308 и II-309) определяется тем, что плотность патоки в опытах была неодинаковая (формулы II-306 и II-307).

Приведенные в [107] значения коэффициента теплопроводности паточных растворов и универсальная формула [формула (1) во введении] позволяют выразить коэффициент теплопроводности паточных растворов [в Вт/(м·К)] в интервале $293\text{—}353$ К в следующем виде:

$$\lambda = \frac{0,663 - 0,0057n}{1000\alpha} \quad (\text{II-310})$$

Коэффициент температуропроводности (в м²/с) патоки ($n=77,9\div 78,5\%$) определяется по формулам [152]:

при $T=288\div 348$ К и условии, что плотность изменяется по формуле (II-305),

$$\alpha \cdot 10^8 = 4,70 + 0,0190T; \quad (\text{II-311})$$

при $T=273\div 353$ К и условии, что плотность изменяется по формуле (II-306),

$$\alpha \cdot 10^8 = 15,5 - 0,0139T. \quad (\text{II-312})$$

Формулы (II-300) и (II-310) позволяют выразить коэффициент температуропроводности паточных растворов (в м²/с) в интервале $293\text{—}353$ К:

$$\alpha \cdot 10^8 = \frac{0,663 - 0,0057n}{1000\alpha c}. \quad (\text{II-313})$$

ТФХ кормовой патоки ($n=85,9\%$, $T=310\text{ K}$) равны [228]: $\rho=1451,5\text{ кг/м}^3$; $c=1980\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,301\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $a=10,4\times 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$.

МЕД

Теплофизические характеристики обезвоженного меда при $T=293\text{ K}$ равны: $c=1465\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ [430] и $\rho=1621\text{ кг/м}^3$ [424].

Значения удельной теплоемкости меда, которые приводятся в литературе, между собой хорошо совпадают (табл. II-306). При $T=293\text{ K}$ и $W=22,1\%$ примерное значение удельной теплоемкости меда $2230\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Таблица II-306

Удельная теплоемкость меда

$T, \text{ K}$	$W, \%$	$c, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	Источник	$T, \text{ K}$	$W, \%$	$c, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	Источник
293	22,1	2428	[216]	—	19,0	1465	[383]
—	18,0	1884	[260]	293	22,1	2554	[230]
293	22,1	2229	[331]				

Зависимость удельной теплоемкости меда [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] ($W=22,1\%$) от температуры ($T=208\div 308\text{ K}$) выражается формулой [230]

$$c = -1739 + 14,65T. \quad (\text{II-314})$$

В интервале влажности $10\text{--}50\%$ удельная теплоемкость меда [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] при температуре 293 K равна [331]:

$$c = 1884 + 15,7W. \quad (\text{II-315})$$

С повышением температуры меда ($W=22,1\%$) от 268 до 308 K его плотность (в кг/м^3) уменьшается [230]:

$$\rho = 1551 - 0,47T, \quad (\text{II-316})$$

Значения плотности меда (в кг/м^3) при разной влажности рекомендуется определять по формуле аддитивности. При $T=293\text{ K}$ формула имеет вид:

$$\rho = 1621 - 6,23W. \quad (\text{II-317})$$

При $T=293\text{ K}$ и $W=22,1\%$ значения плотности меда, вычисленные по формулам (II-316) и (II-317), различаются менее чем на $3,5\%$.

При повышении температуры от 268 до 308 K коэффициент теплопроводности [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$] меда ($W=22,1\%$) равен [230]:

$$\lambda = 0,10 + 0,00087T. \quad (\text{II-318})$$

Экспериментальные данные по теплопроводности меда [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$] при $W=0\div 80\%$ и $T=275\div 344\text{ K}$ [331] позволили рекомендовать формулу [77]

$$\lambda = 0,007 + 0,000807T + 0,0029W. \quad (\text{II-319})$$

Коэффициент теплопроводности меда, вычисленный по формулам (II-318) и (II-319), различается незначительно.

В соответствии с универсальной формулой [формула (I) во введении] коэффициент теплопроводности [в Вт/(м·К)] меда ($W = 22,1\%$) при $T = 288 \div 308$ К равен:

$$\lambda = 0,000289 \rho \alpha. \quad (\text{II-320})$$

Использование формулы (II-319) при $T = 293$ К и формулы (II-317) позволяет выразить зависимость коэффициента теплопроводности меда [в Вт/(м·К)] от влажности и плотности:

$$\text{при } 50 < W < 90\% \quad \lambda = (0,112 + 0,0056W) \rho / 1160; \quad (\text{II-321})$$

$$\text{при } 40 < W < 20\% \quad \lambda = (0,227 + 0,0028W) \rho / 1160. \quad (\text{II-322})$$

При $W = 22,1\%$ коэффициент теплопроводности меда, вычисленный по формулам (II-320) и (II-322), различается незначительно.

С повышением температуры меда ($W = 22,1\%$) от 273 до 308 К его коэффициент температуропроводности (в м²/с) уменьшается [230]:

$$a \cdot 10^8 = 36,8 - 0,09T. \quad (\text{II-323})$$

Использование формул (II-315) и (II-322) позволяет выразить коэффициент температуропроводности меда (в м²/с) при $T = 293$ К и $W = 20 \div 40\%$ в следующем виде:

$$a \cdot 10^8 = \frac{1246,5 + 15,3W}{120 + W}. \quad (\text{II-324})$$

ГЛЮКОЗА

Удельная теплоемкость безводной глюкозы составляет 1263, а кристаллов гидратной глюкозы ($n = 91\%$) — 1526 Дж/(кг·К) [7]. Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] раствора пищевой глюкозы ($n = 35,2 \div 76,9\%$) равна [7]:

$$c = 3661 - 11,6n. \quad (\text{II-325})$$

Плотность (в кг/м³) глюкозных растворов ($n = 20 \div 60\%$) в интервале 293—370 К может быть рассчитана по формуле [186]

$$\rho = 1163 - 0,558T + 3,925n. \quad (\text{II-326})$$

Плотность глюкозы ($W = 0\%$) составляет 1465 кг/м³ [230].

Коэффициент теплопроводности глюкозных растворов [в Вт/(м·К)] в интервале 323—368 К рекомендовано определять по формулам [185]:

$$\text{при } n = 20\% \quad \lambda = 0,239 + 0,001167; \quad (\text{II-327})$$

$$\text{при } n = 40\% \quad \lambda = 0,243 + 0,0009647; \quad (\text{II-328})$$

$$\text{при } n = 60\% \quad \lambda = 0,251 + 0,0006967. \quad (\text{II-329})$$

Формула, выражающая зависимость коэффициента теплопроводности $[\text{в Вт/(м}\cdot\text{К)}]$ глюкозных растворов от n и T , при $n=20\div 60\%$ и $T=323\div 368\text{ К}$ имеет вид [185]

$$\lambda = 0,616 - 0,00284n + (0,1194 - 0,00113n) \cdot 0,01 (T - 273), \quad (\text{II-330})$$

Экспериментальные данные по λ $[\text{в Вт/(м}\cdot\text{К)}]$ и ρ (в кг/м^3) глюкозных растворов и универсальная формула (1) во введении позволяют рекомендовать уравнение

$$\lambda = \frac{0,727 - 0,0052n}{\cdot 1000\alpha} \rho. \quad (\text{II-331})$$

Таблица II-307

Коэффициент теплопроводности аморфной глюкозы

$T, \text{ К}$	273	283	293	303	313	323	333	343	353
$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,337	0,338	0,441	0,354	0,354	0,354	0,352	0,349	0,344

Использование формул (II-325) и (II-331) позволяет выразить коэффициент температуропроводности $(\text{в м}^2/\text{с})$ глюкозных растворов ($n=35,2\div 76,9\%$) при комнатной температуре в следующем виде:

$$a \cdot 10^8 = \frac{727 - 5,2n}{42,468 - 0,1346n} \rho. \quad (\text{II-332})$$

ИНВЕРТНЫЙ СИРОП

ТФХ инвертного сиропа ($n=81,5\%$) в интервале $288\text{—}358\text{ К}$ равны [230]:

$$c = 2340 + 2,93T; \quad (\text{II-333})$$

$$\rho = 1374 - 0,67T; \quad (\text{II-334})$$

$$\lambda = 0,268 + 0,00023T; \quad (\text{II-335})$$

$$a \cdot 10^8 = 6,18 + 0,00897T, \quad (\text{II-336})$$

где c выражена в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; ρ — в кг/м^3 ; λ — в $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, a — в $\text{м}^2/\text{с}$.

Плотность растворов инвертного сиропа (в кг/м^3) при $T=293\text{ К}$ составляет [305]:

$$0 < n < 50\% \quad \rho = 1000 + 4,588n; \quad (\text{II-337})$$

$$50 < n < 85\% \quad \rho = 932 + 5,938n. \quad (\text{II-338})$$

ДРОЖЖИ

Удельная теплоемкость сухих веществ дрожжей [в Дж/(кг·К)] в интервале $T=298\div 353$ К равна [401]:

$$c_{\text{сух}} = 189 + 3,82T. \quad (\text{II-339})$$

Плотность сухих веществ дрожжей ($T=293$ К) составляет 1380 кг/м^3 [160].

Т а б л и ц а II-308

Коэффициент теплопроводности сухих веществ дрожжей [55]

И л р	2	3	4	5	6
$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	0,050	0,056	0,057	0,058	0,058

Т а б л и ц а II-309

Формулы для определения удельной теплоемкости [30] и плотности [401] дрожжей концентратов при $T=278\div 303$ К

Сепарация	$c, \text{ Дж/(кг·К)}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
1-я	$c = 3861 + 0,525 T$	$\rho = 1434 - 1,47T - 0,0010(T-273)^2$
2-я	$c = 3807 + 0,500T$	$\rho = 1436 - 1,46T - 0,0011(T-273)^2$
3-я	$c = 3500 + 1,200 T$	$\rho = 1419 - 1,38T - 0,0009(T-273)^2$

Экспериментальные значения удельной теплоемкости дрожжей [216, 209, 401] и вычисленные по формулам (табл. II-310) различаются на 4—11%.

Т а б л и ц а II-310

Формулы для определения удельной теплоемкости дрожжевых концентратов и хлебопекарных дрожжей [160]

$T, \text{ К}$	$W, \%$	$c, \text{ Дж/(кг·К)}$
275—295	83,75—98,75	$c = 89 + 23,6W + 5,9T$
288—328	54,5—75,0	$c = 1232 + 11,6W + 5,3T$
288—328	4,8—54,5	$c = 1040 + 9,91W + 5,3T$

Плотность хлебопекарных дрожжей (в кг/м^3) при $T=293$ К составляет [160]:

$$\text{при } 0 < W^c < 100\% \quad \rho = 1000 + 380e^{-(0,0216 - 0,00008W^c) W^c}; \quad (\text{II-340})$$

$$\text{при } 100 < W^c < 306\% \quad \rho = 1113 - 0,145 W^c. \quad (\text{II-341})$$

Формула для определения плотности дрожжевых концентратов (в кг/м³) в интервале $T=275\div 295$ К и $W=63,75-96,75\%$ имеет вид [160]:

$$\rho = 1376 - 3,52W - 0,088T. \quad (\text{II-342})$$

Значения плотности дрожжей при $W=69,2\%$, приведенное в [118] и вычисленное по формуле (II-342), различаются всего на 0,1%.

Таблица II-311

Насыпная плотность дрожжей гидролизного производства ρ_n (в кг/м³) [166]

Дрожжи	Диаметр гранулы, мм	Среда		
		нар	гидро	плазмоллизат
Белецкого дрожжевого завода	5	680	670	680
	9	530	523	530
Ленинградского дрож- жевого завода	5	650	655	655
	9	610	611	611

С ростом температуры коэффициент теплопроводности дрожжей [в Вт/(м·К)] увеличиваются, а именно:

для дрожжевых концентратов [160] в интервалах $T=275\div 295$ К и $n=1,25\div 16,25\%$

$$\lambda = 0,100 - 0,00459n + 0,0017T; \quad (\text{II-343})$$

для хлебопекарных дрожжей в интервалах $T=288\div 328$ К и $W^c=30,0\div 120\%$

$$\lambda = -0,015 + 0,0012W^c + 0,0007T; \quad (\text{II-344})$$

в интервалах $T=288\div 328$ К и $W^c=120\div 300\%$

$$\lambda = 0,0345 + 0,00078W^c + 0,0007T. \quad (\text{II-345})$$

Универсальная формула (1) во введении и данные по плотности дрожжей (формулы II-340÷II-342) позволяют предложить уравнение для определения коэффициента теплопроводности [в Вт/(м·К)] дрожжей при разном содержании сухих веществ:

$$\text{при } 0 < n < 45,5\% \quad \lambda \cdot 10^3 = \frac{0,694 - 0,00749n}{\alpha} \rho; \quad (\text{II-346})$$

$$\text{при } 45,5 < n < 76,9\% \quad \lambda \cdot 10^3 = \frac{0,560 - 0,00455n}{\alpha} \rho. \quad (\text{II-347})$$

Коэффициент температуропроводности дрожжевых концентратов (в м²/с) в интервалах $T=275\div 295$ К и $n=1,25\div 16,25\%$ равен [160]:

$$a \cdot 10^8 = 7,025 + 0,025T - 0,08n. \quad (\text{II-348})$$

Коэффициент температуропроводности хлебопекарных дрожжей (в м²/с) в интервале $T=288\div328$ К равен [160]:

$$\text{при } 30 < W^c < 120\% \quad a \cdot 10^8 = 4,60 + 0,022W^c + 0,0073T; \quad (\text{II-349})$$

$$\text{при } 120 < W^c < 300\% \quad a \cdot 10^8 = 5,86 + 0,0111W^c + 0,0073T. \quad (\text{II-350})$$

В [236] приводятся формулы для расчета ТФХ бражки Воронежского дрожжевого завода ($n=3,2\div3,7\%$, $T=293\div363$ К) после выделения из нее дрожжен:

$$c = 3680 + 1,3T; \quad \rho = 1102 - 0,33T;$$

$$\lambda = 0,453(T - 273)^{0,088}, \quad (\text{II-351}); (\text{II-352}); (\text{II-353})$$

где c выражена в Дж/(кг·К), ρ — в кг/м³, λ — в Вт/(м·К).

10. СЫРЬЕ И ПОЛУФАБРИКАТЫ ШОКОЛАДНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ШОКОЛАД

СЫРЬЕ И ПОЛУФАБРИКАТЫ ШОКОЛАДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Какао-бобы. Исследовано влияние на удельную теплоемкость сырых какао-бобов сорта Гана ($W=5,75\%$) температуры. Установлено, что при $T=293, 333, 363, 393$ и 433 К она соответственно составляет 1730, 2095, 2030, 1760 и 1720 Дж/(кг·К) [2]. По данным [260], для какао-бобов (влажность не указана) при $\rho=560$ кг/м³ в интервале 293—383 К удельная теплоемкость практически постоянна и равна 2261 Дж/(кг·К).

При $T=301\div303$ К в какао-бобах протекают полиморфные превращения и кривая эквивалентной теплоемкости характеризуется резко выраженным максимумом — 5500 Дж/(кг·К) [2].

В интервале $T=293\div383$ К коэффициент теплопроводности слоя какао-бобов увеличивается с 0,093 до 0,104 Вт/(м·К), а его коэффициент температуропроводности уменьшается с $8,19 \cdot 10^{-8}$ до $7,50 \cdot 10^{-8}$ м²/с [260].

Какао-масло. Удельная теплоемкость какао-масла из бобов сорта Гана в интервале 293—373 К увеличивается с 2100 до 2200 Дж/(кг·К) [2]. Для какао-масла (влажность не указана) удельная теплоемкость в интервале 283—343 К практически постоянна и равна 2512 Дж/(кг·К) [260], 2010—2261 Дж/(кг·К) [295].

ТФХ какао масла в интервале 283—343 К изменяются [260]:

$$\rho = 1137,3 - 0,75T; \quad (\text{II-354})$$

$$\lambda = -0,303 + 0,0021T; \quad (\text{II-355})$$

$$a \cdot 10^8 = -20,8 + 0,117T, \quad (\text{II-356})$$

где ρ выражена в кг/м³, λ — в Вт/(м·К), a — в м²/с.

При $T=293\div 333$ К [2] или при $T=293\div 313$ К [295] в какао-масле протекают полиморфные превращения с максимальным тепловым эффектом 7080 Дж/(кг·К) [2] или 17920 Дж/(кг·К) [295].

Таблица II-312

Эквивалентная удельная теплоемкость смеси какао-масла со сливочным жиром с [в кДж/(кг·К)] [295]

Содержание, %		Температура T , К					
какао-масло	сливочный жир	273—283	283—293	293—303	303—313	313—323	323—333
90	10	2303	3308	7118	7285	2093	1968
88	12	2345	3433	7537	6448	2093	2010
86	14	2428	3433	7662	6113	2093	2010
84	16	2470	3517	7746	5820	2052	2010
82	18	2512	3601	7913	5401	2052	2010
80	20	2596	3601	7955	5192	2010	2010
78	22	2638	3684	8081	4815	2010	2010
76	24	2640	3768	8165	4480	2010	2010

Какао тертое. Удельная теплоемкость какао тертого из бобов сорта Гана в интервале 293—373 К увеличивается с 1760 до 2055 Дж/(кг·К) [2]. По данным [260], в интервале $T=283\div 343$ К удельная теплоемкость какао тертого практически постоянна и равна 2638 Дж/(кг·К), а другие ТФХ уменьшаются:

$$\rho = 1251,5 - 0,5T; \quad (\text{II-357})$$

$$\lambda = 0,535 - 0,00058T; \quad (\text{II-358})$$

$$\alpha \cdot 10^8 = 17,47 - 0,017T, \quad (\text{II-359})$$

где ρ выражена в кг/м³, λ — в Вт/(м·К), α — в м²/с.

При $T=291\div 293$ К в какао тертом протекают полиморфные превращения с максимальным тепловым эффектом 3500 Дж/(кг·К) [2].

Какао-порошок. Удельная теплоемкость обезжиренного какао-порошка при $T=283, 303, 323$ и 333 К соответственно составляет 1549, 1591, 1800 и 2093 Дж/(кг·К) [295].

Таблица II-313

Плотность, насыпная плотность и удельная теплоемкость какао-порошка

Ж, %	ρ , кг/м ³	ρ_n , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	α_c , %
0	1450	—	—	—
10	1400	350	1717	75
20	1350	450	1759	67

ТФХ какао-порошка ($W=0,6\%$ и $T=298\text{ К}$) при $\rho_m=460\text{ кг/м}^3$ равны: $\lambda=0,046\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $a=19,4\cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$ [230, 87]. С повышением влажности до 35,4% указанные коэффициенты увеличиваются соответственно до 0,092 Вт/(м·К) и $21,7\cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$ [87].

При $\rho_m=857\text{ кг/м}^3$ ТФХ какао-порошка равны: $c=1892\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\lambda=0,18\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $a=11,14\cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$ [260]

ШОКОЛАД

Удельная теплоемкость шоколада «Спорт» [в Дж/(м·К)] в интервале 293—373 К равна [59]:

$$c = 335 + 5T, \quad (\text{II-360})$$

Таблица II-314

Удельная теплоемкость шоколада c [в Дж/(кг·К)] [177]

$T, \text{ К}$	„Спорт“	„Экстра с молоком“	„Соевый“ без арахисовой крупки
273	1507	1340	4020
279	1800	1465	2470
283	1633	1549	2324
289	1423	2093	2345
293	2995	2973	2341
299	6322	5946	2345
303	4522	5024	2345
309	1675	3643	1717
313	1675	2721	4103

Таблица II-315

Теплофизические характеристики шоколада «Золотой якорь» [260]

$T, \text{ К}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a\cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
283	1 70	1675	0,24	11,4
303	1260	1675	0,26	12,2
323	1250	1675	0,27	12,8
343	1240	1591	0,27	13,6

11. ВКУСОВЫЕ ПРОДУКТЫ¹

КОФЕ

Зерна кофе. Исследования теплофизических характеристик сырых целых зерен кофе сорта Робуста показали, что насыпная плотность их практически не зависит от температуры, а с повышением влаж-

¹ Какао — см. подраздел 10.

ности уменьшается. Значения других теплофизических характеристик зерен с повышением температуры и влажности увеличиваются (табл. II-316).

Таблица II-316

Теплофизические характеристики зерен кофе сорта Робуста [108]

T, K	Влажность W, %						
	0	9,1	16,7	23,1	28,6	33,3	37,5

ρ_n , кг/м³

273—323	620	570	530	510	500	500	500
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

λ , Вт/(м·К)

273	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,41
303	0,36	0,39	0,43	0,46	0,49	0,50	0,51
323	0,39	0,43	0,48	0,53	0,57	0,59	0,61

$a \cdot 10^8$, м²/с

273	18	20	23	24	25	25	24
303	19	21	24	26	27	28	29
323	19	22	25	29	30	31	33

c , Дж/(кг·К)

273	2900	2980	3070	3150	3230	3320	3410
303	3110	3240	3360	3450	3530	3610	3650
323	3300	3440	3540	3610	3680	3740	3770

Молотый кофе. При влажности 1,6—7,0% коэффициент теплопроводности молотого кофе [в Вт/(м·К)] при температуре 283 К и насыпной плотности 235 кг/м³ равен [352]:

$$\lambda = 0,044 + 0,00071W. \quad (\text{II-361})$$

Таблица II-317

Формулы для определения коэффициента теплопроводности молотого кофе при $T = 298 \div 313$ К [352]

W, %	ρ_n , кг/м ³	$\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)	W, %	ρ_n , кг/м ³	$\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м·К)
1,6	297	$\lambda = 160 + 1,24 T$	4,5	222	$\lambda = 102 + 1,27 T$
2,5	240	$\lambda = 102 + 1,24 T$	4,4	236	$\lambda = 114 + 1,27 T$
2,5	310	$\lambda = 174 + 1,24 T$	5,0	253	$\lambda = 138 + 1,27 T$
3,0	210	$\lambda = 97 + 1,24 T$			

Таблица II-318

Формулы для определения коэффициента теплопроводности
молотого кофе [351]

T, K	$W, \%$	Изменения определяющих параметров	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
283	2,2	$\rho_n = 200-310 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\lambda = 0,0214 + 0,000108 \rho_n$
313	2,6	$\rho_n = 200-310 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\lambda = 0,0390 + 0,000113 \rho_n$
283	2,2	$e_c = 0,779-0,862$	$\lambda = 0,1662 - 0,1433 e_c$
313	2,6	$e_c = 0,779-0,862$	$\lambda = 0,1751 - 0,1500 e_c$

С повышением температуры молотого кофе (273—333 К) его коэффициент температуропроводности (в $\text{м}^2/\text{с}$) увеличивается [351]:

$$a \cdot 10^8 = A + 0,00619 (T - 273), \quad (\text{II-362})$$

где A — постоянная, зависящая от насыпной плотности. Ее значения приведены ниже.

$\rho_n, \text{кг}/\text{м}^3$	215	240	260	280
$A \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	16,6	16,2	15,4	14,9

В работе [351] приводится коэффициент теплопроводности модели монолитной гранулы кофе, равный $0,248 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Используя это значение и приведенные выше данные, можно определить ориентировочные значения ТФХ монолитной гранулы при условии, что ее влажность 2,6%, а температура 313 К. ТФХ равны: $\rho = 1426 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c = 1664 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $a = 10,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Коэффициент температуропроводности молотого кофе с повышением давления до 30,7 кПа увеличивается. Дальнейшее повышение давления влияния на этот коэффициент кофе не оказывает (табл. II-319).

Таблица II-319

Коэффициент температуропроводности молотого кофе ($\rho_n = 190 \text{ кг}/\text{м}^3$) при нагреве от 314 до 344 К [324]

$p, \text{кПа}$	0,1333	0,665	2,000	20,0	30,7	101,1
$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	10,3	10,9	12,0	14,2	14,9	14,9

Для кофейного суррогата (солодовый кофе) $\rho = 1683$ и $\rho_n = 432 \text{ кг}/\text{м}^3$ [230].

Сухой кофе с цикорием ($T = 323 \text{ К}$) имеет следующие теплофизические характеристики ($T = 323 \text{ К}$): $c = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_n = 797 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda = 0,116 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $a \cdot 10^8 = 14,9 \text{ м}^2/\text{с}$.

Плотность кофейного экстракта ρ (в кг/м^3) [444]

n, %	Температура T, K				
	273	293	313	333	353
10	1043	1041	1032	1023	1010
20	1087	1082	1073	1066	1050
30	1138	1128	1119	1108	1095
40	1189	1180	1168	1156	1144
50	1243	1232	1219	1206	1190

Использование данных по плотности кофейного экстракта (табл. И-320), а также универсальной формулы [формула (1) во введении] позволяет рекомендовать уравнение для определения его коэффициента теплопроводности [в $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$], которое справедливо в интервалах $n = 10 \div 50\%$ и $T = 273 \div 353 \text{ K}$:

$$\lambda \cdot 10^3 = \frac{0,6885 - 0,00545n}{n} \rho. \quad (\text{И-363})$$

ЧАЙ

Удельная теплоемкость экстракта чая ($T = 303 \text{ K}$) после сублимационной сушки при $n = 4, 20$ и 40% соответственно составляет 1591, 1382 и 1047 $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ [135].

Таблица И-321

Теплофизические характеристики чая [225]

$\rho, \text{кг/м}^3$	c [в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$] при W, %			$\lambda \cdot 10^3$ [в $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$] при W, %			$a \cdot 10^8$ [в $\text{м}^2/\text{с}$] при W, %		
	74	75	76	74	75	76	74	75	76
90	3380	3400	3440	2,71	2,74	2,80	8,92	8,97	9,06
120	3430	3460	3500	3,74	3,80	3,93	9,11	9,17	9,28
150	360	3490	3530	4,85	4,90	5,00	9,36	9,42	9,50

ПОВАРЕННАЯ СОЛЬ

Сухая соль. Кристалл соли имеет следующие ТФХ: $c=800-880$ Дж/(кг·К) [109, 209]*; $\rho \approx 2160$ кг/м³ [216]; $\lambda=9,92$ Вт/(м·К) [109]; расчетное значение $a=546,8 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Т а б л и ц а II-325

Молярная теплоемкость соли [125]

T, K	500	600	700	800	900	1000
$c, \text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$	52,45	53,27	54,08	54,90	55,71	56,53

Удельная теплоемкость влажной соли равна: 921 (при $W=2\%$) [260], 1000 (при $W=5,6\%$) и 1100 Дж/(кг·К) (при $W=8\%$) [109].

Насыпная плотность соли определяется ее видом и колеблется от 1025 (усольская выварочная) до 1267 кг/м³ (крымская помола №1) [230]. При $W=0,16\%$ насыпная плотность соли -- 1090 кг/м³ [16].

Совместная обработка экспериментальных данных по коэффициентам теплопроводности [в Вт/(м·К)] и температуропроводности (в м²/с) соли ($T=273-283$ К) при $\rho_n \geq 780$ кг/м³ позволила рекомендовать формулы [230]:

$$\lambda = 0,055 + 0,0006 (\rho_n - 780); \quad (\text{II-372})$$

$$a \cdot 10^8 = 23,3 + 0,034 (\rho_n - 780). \quad (\text{II-373})$$

Т а б л и ц а II-326

Теплофизические характеристики поваренной соли при $T=298$ К [109]

$W, \%$	I сорт			II сорт		
	$c_p, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$c_p, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
0	1500	0,45	30	3400	0,34	10,0
0,8	1187	0,95	80	7798	0,85	10,9
1,6	1229	1,02	83	7542	0,89	11,8
2,0	1156	1,04	90	7377	0,90	12,2
4,0	1130	1,13	100	6875	0,99	14,4
6,0	1139	1,23	108	—	—	16,6
6,4	1147	1,25	109	—	—	—

* Значение c кристалла соли, приведенное в [39], равно 3553 Дж/(кг·К), видимо, завышено.

Раствор поваренной соли в воде. В интервале $T = 253 \div 303$ К и $n = 1,5 \div 18,8\%$ для теплоемкости раствора соли [в Дж/(кг·К)] справедлива формула [230]

$$c = c_{273} + 10,17 (T - 273) \rho_{288} \quad (\text{II-374})$$

где c_{273} — удельная теплоемкость раствора поваренной соли при $T = 273$ К (табл. II-327);

ρ_{288} — плотность раствора поваренной соли при $T = 288$ К (табл. II-328).

Т а б л и ц а II-327

Формулы для определения удельной теплоемкости раствора соли [230, 429]

$n, \%$	$T, \text{К}$	$c, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
1,5—8,3	273	$c = 4141 - 44,4n$
8,3—18,8	273	$c = 4033 - 31,4n$
2—25	350	$c = 4187 - 33,5n$

Т а б л и ц а II-328

Формулы для определения плотности раствора поваренной соли в воде

$T, \text{К}$	$n, \%$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Источ-ник	$T, \text{К}$	$n, \%$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Источ-ник
268	10—25	$\rho = 997 + +8,2n$	[121]	293	1—24	$\rho = 997 + +7,6n$	[49]
273	10—25	$\rho = 998 + +8,1n$	[121]	273—363	24,9	$\rho = 1343 - -0,57$	[265]
288	1,5—18,5	$\rho = 999 + +7,5n$	[230]	273—377	26	$\rho = 1326 - -0,467$	[429]
288,6	5—25	$\rho = 997 + +7,8n$	[292]				

Удельная теплоемкость раствора соли при $n = 22,4\%$ и $T = 273$ К [230], а также при $n = 5 \div 19\%$ и $T = 273 \div 293$ К [292] и вычисленная по формулам (см. табл. II-327) различаются незначительно.

Удельная теплоемкость [в Дж/(кг·К)] раствора соли ($n = 10\%$) в интервале $283 - 333$ К равна [362]:

$$c = 3433 + 0,927. \quad (\text{II-375})$$

В интервалах $n = 5 \div 20\%$ и $T = 273 \div 293$ К коэффициент теплопроводности раствора соли [в Вт/(м·К)] равен [390]:

$$\lambda = 0,145 - 0,00099n + 0,001547. \quad (\text{II-376})$$

Плотность раствора поваренной соли ρ (в кг/м^3) в воде [230]

$n, \%$	Температура T, K			
	313	333	353	373
2	1006	997	985	972
4	1020	1010	999	986
8	1048	1038	1026	1013
12	1077	1067	1055	1042
16	—	1096	1084	1071
20	—	1127	1115	1102
24	—	1158	1146	1133
26	—	1175	1163	1149

Экспериментальные данные [28] свидетельствуют, что формула (II-376) справедлива до $T=303 \text{ K}$.

При $n=0,1 \div 25\%$ для коэффициента теплопроводности [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$] раствора соли ($T=273 \text{ K}$) справедлива формула [230]

$$\lambda = 0,581 - 0,00181n. \quad (\text{II-377})$$

Значения коэффициента теплопроводности раствора соли ($T=273 \text{ K}$) при $n=5 \div 20\%$, которые вычислены по формулам (II-376 и II-377), практически одинаковы.

Использование универсальной формулы (1) во введении позволяет рекомендовать уравнение для определения коэффициента теплопроводности [в $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$], которое справедливо в интервале $n=10 \div 25\%$ и $T=273 \div 373 \text{ K}$:

$$\lambda \cdot 10^3 = \frac{0,688 - 0,0052n}{\alpha} \rho. \quad (\text{II-378})$$

Необходимые значения ρ следует вычислить по формулам, приведенным в табл. II-328.

12. НАПИТКИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ¹

АЛКОГОЛЬНЫЕ НАПИТКИ

Этиловый спирт. В интервале $273-333 \text{ K}$ удельную теплоемкость спирта [в $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$] рекомендовано определять по формуле [217]

$$c = 350 + 7T. \quad (\text{II-379})$$

¹ Соки — см. подраздел 1.

Значения удельной теплоемкости спирта, подсчитанные по формуле (II-379) и по приведенным в литературе [197, 217], различаются незначительно.

Т а б л и ц а II-330

Удельная теплоемкость спирта [217]

T, K	343	353	363	373	383	393	403	413	423
$c, Дж/(кг \cdot K)$	2973	3098	3266	3433	3601	3768	3936	4103	4271

Весьма точно определена плотность спирта при $T=293 K$. Она равна $789,244 \pm 0,005 \text{ кг/м}^3$ [433]. Эти данные легли в основу расчетов новых таблиц по плотности спирта.

Т а б л и ц а II-331

Плотность спирта [217]

T, K	273	283	293	303	313	323	353	373	423	473
$\rho, \text{ кг/м}^3$	806,3	797,9	789,4	781,1	772,2	763,3	734,8	715,7	648,9	556,8

Использование рекомендуемых значений коэффициента теплопроводности спирта [224], плотности и удельной теплоемкости (см. табл. II-330 и II-331 и формулу II-379), а также универсальных формул (1) и (7) во введении позволяет весьма точно выразить зависимости коэффициентов теплопроводности [в $Вт/(м \cdot K)$] и температуропроводности (в $м^2/с$) от температуры для спирта, которые справедливы в интервале 273—353 K. Так как $B=0,273 \cdot 10^{-3}$, а $\alpha = 1,29 = \text{const}$, то

$$\lambda \cdot 10^3 = 0,2116\rho; \quad (\text{II-390})$$

$$\alpha \cdot 10^8 = \frac{21160}{c}. \quad (\text{II-381})$$

Водно-спиртовые растворы. Значения удельной теплоемкости водно-спиртовых растворов, вычисленные по формулам (табл. II-332) и приведенные в литературе [197, 217], различаются незначительно.

Таблица II-332

Формулы для определения удельной теплоемкости водно-спиртовых растворов [217]

п, %	c , Дж/(кг·К)	п, %	c , Дж/(кг·К)
10	$c=6750-8,797T+0,161(T-273)^2$	50	$c=-503+14,977T-0,193(T-273)^2$
20	$c=5260-3,357T+0,063(T-273)^2$	60	$c=-175+12,97T-0,120(T-273)^2$
30	$c=3631+1,997T-0,005(T-273)^2$	70	$c=245+10,367T-0,036(T-273)^2$
40	$c=1350+9,327T-0,110(T-273)^2$	80	$c=484+8,587T$
		90	$c=154+8,797T$

Таблица II-333

Удельная теплоемкость водно-спиртовых растворов c [в Дж/(кг·К)] [217]

п, %	Температура T , К							
	323	333	343	353	363	373	393	413
10	4270	4310	4310	4310	4310	4350	4350	4400
20	4310	4310	4310	4310	4310	4310	4310	4310
30	4400	4440	4480	4520	4560	4610	4690	4770
40	4190	4270	4350	4400	4440	4480	4560	4690
50	4020	4100	4230	4310	4400	4480	4610	4770
60	3850	3940	4100	4230	4350	4480	4730	4980
70	3680	3770	3940	4100	4270	4440	4770	5110
80	3220	3430	3640	3850	4060	4270	4690	5110
90	2930	3140	3350	3560	3770	3980	4400	4810

Таблица II-334

Плотность водно-спиртовых растворов ρ (в кг/м³) [217]

п, %	Температура T , К								
	273	283	293	303	313	323	333	343	353
10	985	984	982	979	975	971	964	957	951
20	976	973	969	964	959	953	947	939	932
30	965	960	954	948	941	935	927	919	910
40	949	942	935	928	920	912	903	894	888
50	929	922	914	906	898	889	880	871	862
60	907	899	891	883	874	865	855	846	837
70	884	876	868	859	850	841	831	822	812
80	860	852	844	836	826	817	807	797	787
90	835	827	818	809	800	791	781	772	762
95	832	813	804	796	786	777	767	760	748

Коэффициент теплопроводности водно-спиртовых растворов
 λ [в Вт/(м·К)] [29]

n, %	Температура T, К				
	273	293	313	333	353
0	0,565	0,599	0,629	0,652	0,670
20	0,451	0,471	0,490	0,505	0,516
40	0,352	0,364	0,373	0,381	0,386
60	0,273	0,276	0,279	0,283	0,285
80	0,213	0,212	0,209	0,208	0,206
100	0,172	0,167	0,162	0,157	0,152

Из данных, приведенных в табл. II-335, видно, что при $n < 80\%$ коэффициент теплопроводности водно-спиртовых растворов с ростом температуры увеличивается, а при $n > 80\%$ уменьшается. При определенном содержании спирта в воде (n_k) коэффициент теплопроводности водно-спиртового раствора от температуры не зависит.

Для определения значения n_k построен график (рис. 47), из которого видно, что при $n < n_k$ определяющее влияние на коэффициент теплопроводности водно-спиртового раствора оказывает вода через коэффициент, характеризующий ассоциацию. Поэтому с ростом температуры коэффициент теплопроводности водно-спиртового раствора увеличивается, однако по мере увеличения n зависимость $\lambda = f(t)$ становится менее ощутимой.

При $n = n_k$ коэффициент теплопроводности водно-спиртового раствора одинаково зависит от плотности и от коэффициента ассоциации. Поэтому он от температуры не зависит.

При $n > n_k$ на теплопроводность водно-спиртового раствора определяющее влияние оказывает спирт через плотность. Поэтому с ростом температуры коэффициент теплопроводности уменьшается.

Водно-спиртово-сахарные растворы. В литературе приводятся только значения удельной теплоемкости и плотности водно-спиртово-сахарных растворов (табл. II-336, II-337).

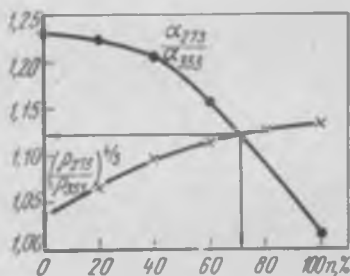


Рис. 47. График для определения значения n_k .

Таблица II-338

Удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности водно-спиртowo-сахарных растворов [248]

Т, К	z=38%, x=5%		z=20%, x=20%		z=21%, x=30%		z=24%, x=40%	
	c_p , Дж/(г·К)	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(г·К)	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(г·К)	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(г·К)	λ , Вт/(м·К)
283	3760	0,403	3647	0,456	3395	0,416	3123	0,347
293	3900	0,409	3764	0,471	3446	0,436	3186	0,382
303	3936	0,422	3977	0,467	3488	0,450	3241	0,391
313	3948	0,440	4078	0,507	3538	0,456	3278	0,407

Таблица II-337

Плотность водно-спиртowo-сахарных растворов ρ (в кг/м³) [248]

Т, К	z=14,31%, x=5%	z=12,05%, x=20%	z=27%, x=10%	z=24,5%, x=30%
273	1000	1065,3	1004,9	1089,2
283	997,7	—	999,9	1083,0
293	994,8	1058,7	994,2	1076,5
303	991,7	1055,6	987,7	1070,2
313	987,4	1051,1	982,1	1063,4

* Содержание (в %) этилового спирта.

** Содержание (в %) сахарозы.

Ликеры и вина. ТФХ вишневого ликера [248, 119] и универсальная формула (приложение 1) позволяют рекомендовать следующую формулу для определения коэффициента его теплопроводности [в Вт/(м·К)], которая справедлива в интервале $T=273\div313$ К:

$$\lambda \cdot 10^3 = \frac{0,413}{t} \rho. \quad (\text{II-382})$$

Необходимые значения глотности ликера приведены в табл. II-338.

Таблица II-338

Г вишневого ликера (общий экстракт 37,6 г на 100 мл при

273	283	293	303	313
1112,5	1105,4	1097,8	1090,0	

Таблица II-339

Коэффициент теплопроводности вина λ [в Вт/(м·К)] [119]

Т, К	„Алиана“	Кагор	„Портвейн 13“	Шартрез
273	0,483	0,467	0,442	0,319
283	0,492	0,476	0,467	0,331
293	0,500	0,482	0,481	0,344
303	0,514	0,491	0,501	0,361
313	0,525	0,504	0,523	0,379
323	0,542	0,523	0,547	0,400
333	0,558	0,544	0,564	0,424
343	0,581	0,566	0,591	0,452
353	0,608	0,593	0,616	0,484

Универсальные формулы (1) и (7) во введении позволяют рекомендовать следующие уравнения для вина, которые справедливы в интервале 283—333 К:

$$\lambda \frac{B}{a} \rho \text{ и } a = \frac{B}{ac}, \quad (\text{II-383})$$

где λ выражена в Вт/(м·К), a — в м²/с.

Значения B равны: для сухого вина — $0,588 \cdot 10^{-3}$, для крепленого — $0,453 \cdot 10^{-3}$, для фруктового — $0,464 \cdot 10^{-3}$ и для белого муската — $0,436 \cdot 10^{-3}$. Необходимые данные по $\rho = f(T)$ и $c = f(T)$ приведены в табл. II-340.

Таблица II-340

Плотность и удельная теплоемкость вина [258]

Т, К	Сухое		Крепленое		Фруктовое		Белый мускат	
	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)
373	996	3881	1034	3680	1018	4056	1092	3601
283	995	3785	1030	3726	1015	4095	1089	3609
293	993	3735	1025	3726	1012	4095	1086	3609
303	991	3709	1020	3726	1008	4095	1082	3609
313	986	3709	1014	3726	1003	4095	1077	3609
323	981	3738	1008	3726	998	4095	1071	3609
333	975	3789	1002	3726	993	4095	1065	3609

Коэффициенты λ и a мезги и суслу из винограда сорта Мускат белый в интервале 283—333 К рекомендуется подсчитывать по формуле (II-383). Значение B равно для мезги $0,560 \cdot 10^{-3}$ и для суслу $0,590 \cdot 10^{-3}$.

Таблица II-341

Плотность и удельная теплоемкость мезги и сусла из винограда сорта Мускат белый [220]

Т, К	Мезга		Сусло	
	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)
273	1297	3919	1117	3731
283	1296	3912	1114	3733
293	1294	3898	1111	3798
303	1290	3890	1107	3915
313	1288	3890	1103	3944
323	1286	3890	1098	3944
333	1286	3894	1091	3944

Болгарские вина и коньяки. Зависимость плотности (в кг/м³) от температуры для вин (табл. II-342) в интервале $T=293-353$ К описывается формулой [279]

$$\rho = \rho_{293} [0,99 - 0,00013 (T - 273) - 0,0000037 (T - 273)^2]. \quad (\text{II-384})$$

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности вин в интервале 293–343 К рекомендуется рассчитывать по универсальным формулам (1) и (7) (см. введение). Необходимые для этого значения B и c приведены в табл. II-342.

Таблица II-342

Удельная теплоемкость и плотность болгарских вин c [в Дж/(кг·К)] [280]

Вино	ρ , %	Содержание сахара, %	Температура T , К							ρ_{293} , кг/м ³	$B \cdot 10^4$
			293	303	313	323	333	343	353		
Рислинг	5,5	9,0	3730	3660	3710	3740	3790	3790	3795	992	0,596
Гамза	5,9	10,0	3785	3660	3660	3740	3785	3785	3790	994	0,588
Хемус	7,2	8,4	3785	3710	3710	3740	3790	3790	3795	999	0,576
Мельник 13	10,4	11,0	4080	4080	4080	4080	4085	4085	4085	1006	0,558
Тырново	17,3	15,0	4075	4075	4075	4075	4080	4080	4080	1024	0,494
Бисер	21,8	13,2	4075	4075	4075	4075	4080	4080	4080	1046	0,431

Плотность коньяка «Плиска» (в кг/м³) в интервале 293–353 К равна [281]:

$$\rho = 1195 - 0,837 \cdot T. \quad (\text{II-385})$$

СЛАБОУАКОГОЛЬНЫЕ НАПИТКИ

Пивоваренный солод. Данных по ТФХ ячменного солода в литературе крайне мало.

Таблица II-343

Теплофизические характеристики ячменного солода
($W^c = 3,1\%$, $\rho_n = 1005 \text{ кг/м}^3$) [189]

$T, \text{ K}$	$c, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
303	1400	0,210	14,6
323	1604	0,248	15,4
348	1754	0,288	16,4

Плотность солода при $W^c = 7,2$ и 75% соответственно равна 1065 и 1214 кг/м^3 [118], а насыпная плотность — 443 (сырой) и 513 кг/м^3 (сухой) [161].

В интервале $W^c = 0 \div 80\%$ плотность солода (в кг/м^3) составляет [12]:

$$\rho = 1102,7 + 1,49W^c. \quad (\text{II-386})$$

Таблица II-344

Теплофизические характеристики материалов пивоваренного производства [255, 258, 427]

Сорт пива	Материал	$K, \%$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$
Ленинградское	Заторная масса	23,5	1097	3580	0,411	10,44
	Сусло неохмеленное	20,2	1062	3672	0,560	14,22
	Сусло охмеленное	20,0	1071,5	3680	0,570	14,43
	Готовое пиво с содержанием спирта 6% и CO_2 $0,29\%$	8,8	1020	3860	0,550	13,97
	Готовое пиво без CO_2	8,8	1020	3860	0,573	14,55
Жигулевское	Заторная масса	20,05	1081	3660	0,511	12,99
	Сусло неохмеленное	16,49	1077	3768	0,563	13,89
	Сусло охмеленное	10,99	1048	3913	0,586	14,30
	Готовое пиво с содержанием спирта $2,9\%$ и CO_2 $0,35\%$	5,5	1008	4008	0,556	13,75
	Готовое пиво без CO_2	5,5	1008	4008	0,597	14,78

С понижением в материале пивоваренного производства экстракта K_1 его плотность уменьшается (см. табл. II-344), а с понижением содержания спирта K_2 — увеличивается (см. табл. II-346).

С повышением температуры материала его ρ уменьшается (см. табл. II-346), так как жидкие материалы характеризуются относительно большим коэффициентом объемного расширения, который с повышением температуры увеличивается.

Для сухого остатка пива его удельная теплоемкость при $T = 273 \text{ К}$ составляет около $1256 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ [248]. Чем меньше в продукте пивоварения экстракта K_1 , тем больше его c (табл. II-344).

Для сусла пива сорта Пражан (ЧССР) при $K_1 = 5 \div 20\%$ зависимость средней теплоемкости [в $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$] от K_1 в интервале температур $293\text{—}343 \text{ К}$ выражается формулой [375]

$$c = 3977 - 8,37K_1. \quad (\text{II-387})$$

С повышением температуры материала пивоваренного производства его c увеличивается (табл. II-344). Так, для сусла пива сорта Пражан при $K_1 = 10\%$ в интервале $293\text{—}343 \text{ К}$ справедлива формула

$$c = 3403 + 1,67T, \quad (\text{II-388})$$

где c выражена в $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Данные [258] о том, что для продуктов и полупродуктов производства пива сортов Жигулевское и Московское удельная теплоемкость имеет отрицательный температурный ход, вызывают сомнение.

Значения удельной теплоемкости сусла и пива разных сортов (табл. II-345 и II-346) и угловые коэффициенты в формулах (II-387 и II-388) свидетельствуют о том, что на эту ТФХ материалов оказывает более существенное влияние K_1 , чем температура. Вообще можно считать (с точностью до 2%), что c материалов пивоваренного производства в интервале $273\text{—}363 \text{ К}$ не зависит от температуры.

Т а б л и ц а II-345

Удельная теплоемкость материалов пивоваренного производства
с [в $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$] [255, 427]

Сорт пива	Материал	Температура T , К				
		323	333	343	353	363
Ленинградское	Сусло	3680	3701	3718	3730	3762
	Пиво	3860	3876	3879	3873	3910
Жигулевское	Сусло	3915	3919	3931	3944	3961
	Пиво	4007	4011	4019	4023	4028
—	Сусло	4035	4055	4077	—	—
	Пиво	4112	4134	4157	—	—

С уменьшением K_1 в материалах пивоварения теплопроводность увеличивается, однако для готового пива она меньше, чем охмеленного сусла. Объясняется это низкой теплопроводностью углекислого газа. Характерно, что готовое пиво (без газа) обладает большим λ , чем охмеленное сусло (табл. II-344).

Плотность материалов пивоваренного производства ρ (в кг/м³)

Сорт пива	Материал	K ₁ , %	K ₂ , %	Температура T, К								Источ- ник		
				273	283	293	303	313	323	333	343		353	363
Ленинградское	Суело	20,0	0	—	—	—	—	—	1071	1067	1061	1055	1049	[253]
	Пиво	8,8	6,0	—	—	—	—	—	1020	1014	1010	1002	1002	[255]
Жигулевское	Суело	8,3	5,89	1024	1023	1021	1016	1014	1048	1040	1039	1020	1015	[248]
	Пиво	10,99	0	—	—	—	1040	—	—	1024	—	—	—	[253]
Московское	Суело	—	—	1046*	—	—	—	—	1008	1004	1000	1000	1000	[255]
	Пиво	5,5	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[256]
Праздан (Чехословакия)	Суело	5,45	2,89	—	1017	—	1050	—	—	1037	—	—	—	[258]
	Пиво	—	—	1055**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[258]
	Суело	5,89	3,68	—	1018	1048	1046	1042	1037	1032	1027	—	—	[427]
	Пиво	12,0	—	—	1050	1029	1026	1022	1018	1013	1007	—	—	[427]
	Суело	12,35	4,18	—	1030	1029	1026	1029	1020	1016	1010	1010	1005	[375]
	Пиво	—	—	—	—	1028	1026	1029	1020	1016	1010	1010	1005	[375]
	Суело	—	—	—	—	1007	1005	1003	1000	995	991	987	980	[375]
	Пиво	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[375]

* При $T=277$ К.** При $T=277,6$ К.

Коэффициент теплопроводности сусла и пива рекомендуется рассчитывать по универсальной формуле (1) (см. введение). Необходимые для этого значения B приведены в табл. II-347.

Таблица II-347

Постоянная B для сусла и пива

Сорт пива	$B \cdot 10^6$		Сорт пива	$B \cdot 10^6$	
	сусло	пиво		сусло	пиво
Ленинградское	0,567	0,600	Московское	0,572	0,623
Жигулевское	0,607	0,608	—	0,624	0,647

Таблица II-348

Коэффициент температуропроводности материалов пивоваренного производства $\alpha \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) [255, 258, 427]

Сорт пива	Материал	Температура T , К								
		283	293	303	313	323	333	343	353	363
Ленинградское	Сусло	—	—	—	—	14,5	15,1	15,2	15,3	15,5
	Пиво	—	—	—	—	14,0	14,4	14,6	14,9	14,8
Жигулевское	Сусло	—	—	—	—	14,3	14,8	15,1	15,6	15,1
	Пиво	—	—	—	—	13,9	14,0	14,5	14,7	14,8
Московское	Сусло	—	—	14,3	—	—	15,2	—	—	—
	Пиво	12,4	—	—	—	—	—	—	—	—
—	Сусло	13,1	13,5	13,9	14,2	14,5	14,7	15,0	—	—
	Пиво	13,3	13,7	14,1	14,4	14,7	14,9	15,2	—	—

13. УПАКОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сведения по теплофизическим характеристикам упаковочных материалов крайне ограничены (табл. II-349—II-350).

Таблица II-349

Коэффициент теплопроводности λ и тепловое сопротивление δ/λ упаковочных материалов [191, 313, 422]

Материал	$\delta \cdot 10^3, \text{ м}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\frac{\delta}{\lambda} \cdot 10^9, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$
Картон	—	0,093	—
парафинированный	0,27	0,075	3,6
	0,625	—	11,16
с алюминиевой фольгой	0,568	—	9,3
с целлофановым мешочком	—	—	21,9
парафинированный, завернутый в четырехслойный целлофан	0,737	—	12,7
Целлофан	0,028	0,100	0,28
четырёхслойный	0,12	0,100	1,20
	0,11	—	1,51
пленка	0,146	—	3,02
Пергамент	—	—	1,92
двойной вошенный	0,053	0,071	0,74
четырёхслойный	0,212	0,071	3,01
вошенный 2 раза	0,212	—	4,07
Полупергамент парафинированный	—	—	4,85
Бумага вошенная	—	—	6,98
Алюминиевая фольга	0,1	—	0,0007
	0,04	203	0,0002

Таблица II-350

Теплофизические характеристики упаковочных материалов [191, 313, 422]

Материал	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c, \text{ Дж/(кг·К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·К)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
Полиэтилен	—	—	0,315	—
низкой плотности	920	2300	0,335	15,8
высокой плотности	955	2300	0,48	21,7
Полипропилен	913	1926	0,12	6,8
Полнстирол обычный	1050	1340	0,10—0,14	7,1—10,0
Нейлон	1089	1675	0,24	13,2
Тефлон	2243	1047	0,26	11,1

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

К введению

1. *Александренко А. А.* Общий метод оценки погрешностей определения теплофизических характеристик из приближенных решений. — Труды VI Всесоюз. конф. по теплофиз. свойствам веществ. — Минск, 1978, с. 69—70.
2. *Бувич Ю. А., Корнеев Ю. А.* Эффективная теплопроводность дисперсной среды при малых числах Пекле. — ИФЖ, т. XXXI, № 4, 1976, с. 607—612.
3. *Варгафтик Н. Б.* Теплопроводность жидкостей. — Известия ВТИ, № 8, 1949, с. 6—11.
4. *Водогинский В. Э.* Теплоемкость пищевых веществ и пищевых продуктов. — М.: изд. МОНИТОЭ, 1937. — 22 с.
5. *Гинзбург А. С.* Теплофизические основы процесса выпечки. — М.: Пищепромиздат, 1955. — 457 с.
6. *Гинзбург А. С.* Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 528 с.
7. *Гинзбург А. С., Рыжова Е. И., Бантыш Л. А.* Кинетика изменений теплофизических характеристик при замораживании плодово-ягодных соков. — В кн.: Теплообменные процессы и аппараты химических производств. М.: МИХМ, 1976, с. 117—122.
8. *Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П., Муратова Б. Л.* Теплопроводность твердых пористых увлажненных материалов. — ИФЖ, т. XXXI, № 2, 1976, с. 278—283.
9. *Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П., Новиков В. В.* Коэффициенты обобщенной проводимости гетерогенных систем с хаотической структурой. — ИФЖ, т. XXXI, № 1, 1976, с. 150—168.
10. *Комбинированный численный метод определения проводимости составных тел* [Г. Н. Дульнев, М. А. Еремеев, Ю. П. Заричняк, Е. Н. Колтунова]. — ИФЖ, т. XXXII, № 2, 1977, с. 284—291.
11. *Колпацников В. Л., Шнип А. И.* Теоретические исследования теплофизических свойств на основе термодинамической теории. — Труды VI Всесоюз. конф. по теплофизическим свойствам веществ. — Минск, 1978, с. 67—68.
12. *Коротков А. В., Гинзбург А. С., Рыжова Е. И.* Зависимость теплоемкости жидких пищевых продуктов от температуры в процессах охлаждения и замораживания. — В кн.: Теплообменные процессы и аппараты химических производств. М.: МИХМ, 1976, с. 123—127.
13. *Кришер О.* Научные основы техники сушки. — М.: ИЛ, 1961. — 420 с.
14. *Лыков А. В.* Тепломассообмен. — М.: Энергия, 1978. — 479 с.
15. *Методы определения теплопроводности и температуропроводности* [А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. М. Абраменко, В. П. Козлов]. — М.: Энергия, 1973. — 336 с.
16. *Миснар А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968. — 460 с.
17. *Незнамова Н. А., Панин А. С., Пучкова Л. И., Скверчак В. Д.* Исследование теплофизических характеристик теста-хлеба из пшеничной муки I сорта в процессе выпечки. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1978, № 8, с. 12—13.
18. *Предводителей А. С.* ЖФХ, т. XXII, № 3, 1948, с. 339.

19. Ребиндер П. А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки. — Труды Всесоюзн. научно-техн. совещ. по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельского хозяйства. — М.: Профиздат, 1958, с. 14.

20. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов [А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская, В. С. Уколов]. — М.: Пищевая промышленность, 1975. — 223 с.

21. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей. — М.: Изд-во МГУ, 1970. — 239 с.

22. Филиппов Л. П. Методика расчета теплоемкости и теплопроводности жидкостей. — ИФЖ, т. XXXII, № 4, 1977, с. 607—611.

23. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. — М.: Физматгиз, 1962. — 455 с.

К разделу I

1. Агроскин А. А., Гончаров Е. Изменение теплоемкости пищевых продуктов. — Известия вузов Пищевая технология, 1973, № 4, с. 124—127.

2. Андрианов Ю. П., Твердохлеб Г. В. Теплофизические показатели сливок различной жирности. — Известия вузов Пищевая технология, 1967, № 6, с. 72—77.

3. Волькенштейн В. С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. — Л.: Энергия, 1971. — 144 с.

4. Гинзбург А. С., Уколов В. С. Опыт систематизации методов определения теплофизических характеристик зернистых материалов. — Труды Ин-та тепло- и массообмена, 1972, т. 7, с. 352—356.

5. Гинзбург А. С., Рыжова Е. И., Бантыш Л. А. Кинетика изменений теплофизических характеристик при замораживании плодово-ягодных соков. — В кн.: Теплообменные процессы и аппараты химических производств. — М.: МИХМ, 1976, с. 117—122.

6. Гисина К. Б., Новиченок Л. Н. Исследование теплопроводности биопрепаратов при сублимации в условиях вакуума. — В кн.: Реофизика и реодинамика текучих систем. — Минск: Наука и техника, 1970.

7. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — М.: Энергия, 1974. — 264 с.

8. Камья Ф. М. Импульсная теория теплопроводности: перевод с французского. — М.: Энергия, 1972. — 271 с.

9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 300 с.

10. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. — М.; Л.: ГНТИ, 1957. — 220 с.

11. Крамер П. И., Козловский Т. Т. Физиология древесных растений: перевод с английского. — М.: Гослесбумиздат, 1963. — 627 с.

12. Красников В. В., Панин А. С., Скверчак В. Д. Метод комплексного определения теплофизических характеристик вязких жидкостей, суспензий и мелкодисперсных материалов. — Известия вузов Пищевая технология, 1976, № 2, с. 138.

13. Красовская Г. И. Определение термических констант зерновой массы. — Труды МТИППа, 1952, вып. 1, с. 68—76.

14. Красовская Г. И., Черненко Л. Е., Шалыт С. Я. Физико-химические основы пищевых производств. — М.: МТИПП. 1952. — 412 с.

15. Красовский Л. И., Чашухин В. А. Кислородный режим тростника обыкновенного. — Физиология растений, 1974, т. 21, вып. 2, с. 315—319.

16. Красовский Л. И., Чашухин В. А. Состояние воды в растительных тканях при отрицательных температурах в природных условиях. — Физиология растений, 1974, т. 21, вып. 5, с. 976—979.

17. Лыков А. В. Тепломассообмен. — М.: Энергия, 1978. — 479 с.

18. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

19. Методы определения теплопроводности и температуропроводности/[А. Г. Пашков, Г. М. Волохов, Т. М. Абраменко, В. П. Козлов]. — М.: Энергия, 1973. — 336 с.

20. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей и газов и их композиций: перевод с французского. — М.: Мир, 1968. — 460 с.

21. Панин А. С., Скверчак В. Д. Экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности аморфных и мелкодисперсных материалов. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 1, с. 140—143.

22. Попов В. В. Определение теплопроводности сушеных рыбных продуктов в вакууме. — Известия вузов Пищевая технология, 1970, № 6, с. 93—95.

23. Симовьян С. В., Исерович И. Т. Теплофизические свойства рыбных фаршей. — Известия вузов Пищевая технология, 1978, № 6, с. 48—51.

24. Скаковский Р. Ф., Масликов В. А. Определение теплопроводности подсолнечной мятки. — Известия вузов Пищевая технология, 1968, № 3, с. 170—172.

25. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов/[А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская, В. С. Уколов]. — М.: Пищевая промышленность, 1975. — 223 с.

26. Терентьев Ю. А., Попов В. Д. Теплофизические свойства некоторых продуктов свеклосахарного производства. — В сб.: Пищевая промышленность. Киев, 1965, вып. 2, с. 61—68.

27. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей. — М.: Изд-во МГУ, 1970. — 239 с.

28. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. — М.: Физматгиз, 1962. — 455 с.

29. Шевельков В. Л. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. — М.: Госэнергоиздат, 1958. — 96 с.

30. Adam M., Havlicěk Z., Balcar V. Fyzikální Vlastnosti potravin Zemědělska technika Ustav vedeckotechnickch informací, Praha. 1968, 14(XLI), č. 5, с. 301—310.

31. Ch. M. Hiescu. Constante termofizice ale principalelor produse alimentare, 1971. «Editura tehnica», Bucuresti, 186 с.

32. Havlicěk Z., Balcar V., Adam M. Experimentální stanovení teplotní tepelné vodivosti potravin. Průmysl, čís. 12, 18 (1967), S. 1—7.

33. Коларов К. М. Экспериментальные исследования топливныи свойства на домашни продукти. — ИТ на ВИХВП (НРБ), т. 18, св. 2, 1971.

34. Милчев В. А. Към въпроса за аналитично определяна на характернизиращата температура при определяне на теплофизическите константи по метода на неограничен еталон. — Известия на ВМЕИ В. И. Ленин (НРБ), юбилейно издание, кн. 11, София, 1970.

35. Rha Chokyun, Thermal properties of food materials, 1975. Dordrecht—Boston, 400 p.

36. Riedel L. Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Eiklar und Eigelb. — «Kältetechnik», v. 9, 1957, № 11, p. 342—345.

37. Riedel L. Kalorimetrische untersuchen ao Backhefe. — «Kältetechnik», v. 20, 1968, № 9, p. 291—293.

38. Saravacos G. D. and Pilsworth M. N. Thermal Conductivity of Freeze-dried model Food Gels. Journal of Food Science, v. 30, № 5, 1965.

К разделу II

1. Авербух Д. А., Меткин В. П., Чистова Т. Г. Теплофизические и физико-химические характеристики растворов лимоникислотного производства. — В сб.: Кондитерская промышленность. — М.: ЦНИИТЭИ, 1977, № 2, с. 15—25.

2. Агроскин А. А., Гончаров Е. И., Клешко Г. М. Теплофизические свойства какао бобов, какао тертого и какао масла. — Хлебопечарная и кондитерская промышленность, 1973, № 7, с. 17—19.

3. Андрианов Ю. П. Влияние температуры и концентрации молочного жира на физические свойства сливок в связи с их переработкой в сливочное масло. Автореф. канд. дис. — М., 1971.

4. Андрианов Ю. П. Исследование теплоемкости сливок. — Труды ВНИИ масл. и сырод. пром-сти, 1973, вып. 13, с. 39—42.

5. Андрианов Ю. П. Плотность молочного жира в интервале температур 0—40° С. — Труды ВНИИ масл. и сырод. пром-сти, 1972, вып. 9, с. 250—254.

6. Артемьев А. А. Определение расчетным методом плотности жидкого жира и коэффициента его объемного расширения при изменении агрегатного состояния. — Молочная промышленность, 1972, № 5, с. 18, 19.

7. Архипович Н. А., Петрушевский В. В. Удельная теплоемкость продуктов производства патоки и глюкозы. — В сб.: Пищевая промышленность. — М.: ЦНИИТЭИ, 1969, № 9, с. 7—10.

8. Ащиян О. А., Церодзе А. В. Некоторые физико-механические свойства плодово-ягодного сырья в соковом производстве. — Труды Груз. НИИ пищ. пром-сти, 1971, вып. 4, с. 258—263.

9. Бабанов Г., Рубаник В., Мыслович В. Определение теплофизических коэффициентов мясного фарша. — Мясная индустрия СССР, 1965, № 4, с. 44—47.

10. Бабарин В. П. Методы исследования физико-механических свойств жидких и пюреобразных продуктов консервного производства. — М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1971. — 23 с.

11. Бабарин В. П., Фромзель О. Г., Тартаковская Э. М. Исследование физико-механических свойств томатопродуктов. — Труды ВНИИ консерв. и овощесуш. пром-сти, 1972, вып. 16, с. 29—32.

12. *Балашов В. Е.* Теплопроводность пивоваренного солода. — Известия вузов Пищевая технология, 1960, № 2, с. 123—128.
13. *Беккетт Д., Эммонс Д., Эллиотт Д.* Определение объемного веса, плотности частиц и распределение частиц по величине в сухом обезжиренном молоке. — XVI Междунар. конгр. по молочному делу. — М.: Пищепромиздат, 1963, с. 59—62.
14. *Беляев М. И., Положенцев Г. Н., Федоров И. Н.* Некоторые физические и теплофизические характеристики фритюрных жиров. — Масло-жировая промышленность, 1973, № 4, с. 18—19.
15. *Богатырев Ю. А., Любушкин В. Т.* Физико-мех. свойства мелкой кукурузной крупы. — ЦНИИТЭИ Мин. з. Мукомольно-крупяная промышленность, серия «Хранение и переработка зерна», 1973, № 3, с. 14—19.
16. *Блинов Ю. М., Ведерников В. М.* Исследование физико-механических свойств сыпучих материалов пищевого концентрата промышленности. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1976, № 6, с. 40—42.
17. *Бонева Л. А., Левицкий Е. А.* Изменение физических, реологических и технологических показателей томопродуктов при производстве томатной пасты. — Реферат. инф. о законченных НИР в вузах. — «Пищевая технология», 1974, вып. 9, с. 35—36.
18. *Бородин В. А.* Лабораторный прибор для определения объемного веса сухого молока. — Молочная промышленность, 1969, № 3, с. 28.
19. *Бородин В. А.* Сравнительная оценка физических свойств сухого молока, полученного в распылительных сушилках. — Молочная промышленность, 1971, № 11, с. 10—13.
20. *Будина В. Г.* Параметры режимов термообработки при производстве рыбных сосисок. — Рыбное хозяйство, 1977, № 1, с. 71—73.
21. *Будина В. Г., Громов М. А.* Теплофизические свойства сформированной рыбной сосиски без оболочки. — Известия вузов Пищевая технология, 1976, № 5, с. 133—136.
22. *Будина В. Г., Громов М. А.* Теплофизические характеристики рыбы и продуктов из нее. — ЦНИИТЭИ рыбного хозяйства. Обзорная информация, серия «Обработка рыбы и морепродуктов», 1977, — 40 с.
23. *Будина В. Г., Громов М. А., Рехина Н. И.* Эквивалентные теплофизические характеристики рыбных сосисок без оболочки. — Труды ВНИРО, 1977, т. 78, с. 76—85.
24. *Будина В. Г., Громов М. А., Королева Е. И.* Теплофизические характеристики сока криля. — Рыбное хозяйство, 1978, № 10, с. 75, 76.
25. *Бывальцев Ю. А., Перелыгин Б. Г., Полянский К. К.* Теплопроводность водных растворов лактозы. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 1, с. 70—72.
26. *Бывальцев Ю. А., Перелыгин Б. Г., Полянский К. К.* Теплоемкость водных растворов лактозы. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 3, с. 159—161.
27. *Варгафтик Н. Б.* Теплопроводность жидкостей. — Известия ВТИ, 1949, № 8, с. 6—11.
28. *Варгафтик Н. Б., Осмина Ю. П.* Теплопроводность водных растворов солей, кислот и щелочей. — Теплоэнергетика, 1956, № 7, с. 11—16.

29. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972 — 708 с.
30. *Васьков Е. Т., Зобов А. М., Потрошков В. А.* Тепло и плотность дрожжевых концентратов. — Известия вузов Пищевая технология, 1969, № 1, с. 85—87.
31. *Веселовская Н.* Плотность масла и содержание в нем воздуха. — Молочная промышленность, 1959, № 8, с. 18.
32. *Вожак Л., Мазур П.* Зависимость теплофизических свойств при посоле от ее сорта и влажности. — Мясная индустрия, 1969, № 11, с. 41—42.
33. *Вожак Л.* Диаграмма зависимости продолжительности охлаждения измельченного мяса от толщины слоя. — Мясная индустрия, 1970, № 8, с. 34, 35.
34. *Чоградов Я. И.* Исследование реологических свойств колбасного фарша при кондуктивной термообработке в форме под давлением. Автореф. канд. дис., М., 1974. — 22 с.
35. *Влага в зерне* / [А. С. Гинзбург, В. П. Дубровский, Е. Д. Козаков и др.]. — М.: Колос, 1969. — 224 с.
36. *Влияние термо- и гигротермообработки на свойства макаронного теста* / [А. С. Гинзбург, Н. И. Назаров, Г. В. Цивцивадзе и др.]. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1976, № 5, с. 37—38.
37. *Войтко А. М., Ковалева Р. И., Цапкин В. А.* Исследование некоторых физических характеристик концентрированного виноградного сока. — Труды Молдавского НИИПП, 1967, т. 7, с. 61—74.
38. *Волков М. А., Громов М. А., Михайлов В. Д.* Тепло- и массообменные характеристики сахара-песка. — ИФЖ, 1975, № 2, с. 346—347.
39. *Волькенштейн В. С.* Скоростные методы определения теплофизических характеристик материалов. — Л.: Энергетика, 1971. — 144 с.
40. *Вышелесский А. Н., Громов М. А., Подольский В. С.* Зависимость коэффициента объемного расширения подсолнечного масла от термических параметров. — Масло-жировая промышленность, 1974, № 1, с. 10—12.
41. *Вышелесский А. Н., Беляев М. И., Одарченко Н. С.* Выпечка пресного теста и взаимосвязь влажности и теплопроводности готовых изделий. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1975, № 8, с. 20—22.
42. *Вышелесский А. Н., Громов М. А., Переверзев В. В.* Физические характеристики ядер круп. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 2, с. 152—154.
43. *Вышелесский А. Н., Громов М. А., Переверзев В. В.* Теплофизические характеристики крупы. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 3, с. 108—111.
44. *Вышелесский А. Н., Громов М. А., Переверзев В. В.* Некоторые физические свойства круп. — Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1974, № 8, с. 46—47.
45. *Вышелесский А. Н., Громов М. А.* Теплопроводность пищевых растительных масел. — Масло-жировая промышленность, 1967, № 4, с. 7—9.
46. *Вышелесский А. Н., Громов М. А.* Исследование теплопроводности некоторых овощей. — Труды ВНИИторгмаша, 1962, № 8, с. 98—109.

47. Вышелесский А. Н., Громов М. А. Теплофизические характеристики картофеля и овощей. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1963, № 11, с. 25—27.

48. Вышелесский А. Н., Громов М. А. Исследование теплофизических характеристик овощей. — Труды ВНИИторгмаша, 1963, № 9, с. 57—69.

49. Галущенко В., Жирный П., Федоткин И. Исследование теплофизических характеристик некоторых видов колбасных изделий при охлаждении. — Мясная индустрия, 1976, № 12, с. 36—37.

50. Гейнц Р., Логинов Л. Номограмма для определения продолжительности охлаждения мясных полутуш. — Мясная индустрия, 1968, № 7, с. 5—6.

51. Герасименко А. А. Кристаллизация сахара. — Киев: Наукова думка, 1965. — 316 с.

52. Герасименко А. А., Шапошникова З. Б. Вязкость и удельный вес чистых сахарных растворов сиропа и зеленой патоки при 70, 80 и 90° С. — Сахарная промышленность, 1969, № 8, с. 27—28.

53. Гинзбург А. С. Теплофизические основы процесса выпечки. — М.: Пищепромиздат, 1955. — 467 с.

54. Гинзбург А. С. Сушка пищевых продуктов. — М.: Пищепромиздат, 1960. — 683 с.

55. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 528 с.

56. Гинзбург А. С., Рыжова Е. И., Бантыш Л. А. Кинетика изменения теплофизических характеристик при замораживании плодово-ягодных соков. — В кн.: Теплообменные процессы и аппараты химического производства. М., 1976, с. 117—121.

57. Гинзбург М. Е., Зуев Ф. Г. Крупа и крупяные продукты. — М.: ЦИНИТИ Госкомзага, 1966, с. 5—27.

58. Головкин Н., Шагин О., Алямовский И. Зависимость продолжительности охлаждения мяса от скорости движения воздуха. — Мясная индустрия, 1955, № 1, с. 15—19.

59. Гончаров Г. А., Гягунов В. М., Иванов А. Ю. — Комплексное измерение теплофизических характеристик пищевых продуктов. — Известия вузов Пищевая технология, 1977, № 2, с. 148—152.

60. Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1979. — 381 с.

61. Горбатов В. М. Исследование, теоретические обоснования и внедрение усовершенствованных технологических процессов основных производств мясной промышленности. — Автореф. канд. дис. — М., 1974. — 90 с.

62. Горбатов В. М., Масюков В. Н., Еремин В. И. Исследование теплофизических параметров мяса. — Труды ВНИИМПа, 1971, вып. 25, ч. 2, с. 85—104.

63. Гочияев Б. Р. Определение вязкости и удельного веса яблочного сока. — Известия вузов Пищевая технология, 1964, № 4, с. 93—95.

64. Гришин М. А. Интенсификация процесса сушки пищевых растительных материалов. — Автореф. докт. дис. — Одесса, 1974. — 54 с.

65. Гробер М. Расчет продолжительности термической обработки колбасных изделий. — Мясная индустрия, 1964, № 5, с. 19—21.

66. Громов М. А. Исследование некоторых теплофизических характеристик овощей в процессах их варки и жарки. — Автореф. канд. дис. — М., 1964. — 17 с.

67. Громов М. А. Теплофизических свойствах плодов и овощей. — Известия вузов Пищевая технология, 1971, № 2, с. 178, 179.

68. Громов М. А. О расчете теплоемкости рыбы. — Рыбное хозяйство, 1971, № 3, с. 63—64.

69. Громов М. А. Теплофизические характеристики крахмала. — Сахарная промышленность, 1971, № 4, с. 67—70.

70. Громов М. А. Теплофизические характеристики высушиваемых овощей. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1971, № 6, с. 33—34.

71. Громов М. А. Теплофизические характеристики яйцепродуктов. — Мясная индустрия, 1971, № 10, с. 35—36.

72. Громов М. А. Теплофизические характеристики плодов. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1971, № 10, с. 35—36.

73. Громов М. А. Теплофизические характеристики плодов при отрицательной температуре. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1972, № 2, с. 34—35.

74. Громов М. А. Универсальное уравнение для расчета коэффициента теплопроводности сока. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1972, № 8, с. 32—33.

75. Громов М. А. Теплофизические свойства растительных масел и жиров. — Масло-жировая промышленность, 1973, № 3, с. 15—17.

76. Громов М. А. Теплопроводность сахара. — Сахарная промышленность, 1973, № 9, с. 32—35.

77. Громов М. А. Теплофизические характеристики меда. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1973, № 12, с. 16—17.

78. Громов М. А. Формула для расчета коэффициента теплопроводности сливок. — Молочная промышленность, 1974, № 2, с. 25—27.

79. Громов М. А. Теплофизические характеристики некоторых молочных продуктов. — Молочная промышленность, 1978, № 8, с. 13—18.

80. Громов М. А. Теплофизические характеристики плазмы молока. — Молочная промышленность, 1979, № 4, с. 37—39.

81. Громов М. А. Теплофизические характеристики крахмала. — Сахарная промышленность, 1979, № 3, с. 48—51.

82. Громов М. А., Беляев М. И., Федоров Н. Н. Теплопроводность и плотность фритюрных жиров при термической обработке. — Масло-жировая промышленность, 1974, № 8, с. 9—10.

83. Громов М. А., Будина В. Г. Плотность рыбной сосисочной массы. — Труды МИНХа им. Г. В. Плеханова, 1977, вып. 4, с. 32—39.

84. Громов М. А., Будина В. Г., Королева Е. И. Температуропроводность мяса рыбы. — Труды МИНХа им. Г. В. Плеханова, 1976, вып. 3, с. 26—33.

85. Громов М. А., Дибиров А. М. Теплофизические характеристики плодов при консервировании компотов. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1979, № 1, с. 34—36.

86. Громов М. А., Королева Е. И., Будина В. Г. Термические характеристики пасты «Океан». — Известия вузов Пищевая технология, 1980, № 3.
87. Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики сахара-песка. — Сахарная промышленность, 1967, № 5, с. 24—27.
88. Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики картофеля и овощей. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1967, № 9, с. 13—16.
89. Громов М. А., Переверзев В. В. Теплофизические характеристики риса. — Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1973, № 10, с. 39.
90. Громов М. А., Шалунова Г. И. Физические свойства мороженого рыбного фарша. — Рыбное хозяйство, 1971, № 2, с. 59—61.
91. Громов М. А., Шалунова Г. И. Теплофизические свойства брикетированных рыбных фаршей. — Труды МИНХа им. Г. В. Плеханова, 1973, вып. 1, с. 97—102.
92. Гуськов К. П., Мачихин Ю. А. Влияние давления и влажности на объемный вес макаронного теста. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1962, № 7, с. 16.
93. Даишев М. И., Орлова Н. В. Удельный объем и коэффициент преломления компонентов чистого сахарного раствора. — Известия вузов Пищевая технология, 1975, № 3, с. 98—102.
94. Дикис т. Н., Романтовская Т. Л. О расчете продолжительности охлаждения обжаренной рыбы в жидкой охлаждающей среде. — Известия вузов Пищевая технология, 1963, № 5, с. 83—86.
95. Доронин А. Ф. Исследование процесса термической обработки кукурузных хлопьев ИК-лучами. — Автореф. канд. дис. — М., 1975. — 199 с.
96. Дущенко В. П., Андрианов В. М., Кучерук И. М. Исследование теплофизических свойств крахмала в зависимости от влагосодержания при отрицательной температуре. — Тезисы докладов совещания «Пути ускоренного научно-технического прогресса в мясной и молочной промышленности Украины», Киев, 1972, ч. 1, с. 117, 118.
97. Дущенко В. П., Барановский В. М., Байджанов Х. Б. Зависимость коэффициентов тепло- и массопереноса в коллоидных системах от влажности и температуры. — Известия вузов Пищевая технология, 1967, № 3, с. 146—150.
98. Дьяченко П., Хлопотова Н. Корреляционная зависимость между температурой замерзания, химическим составом и плотностью молока. — Молочная промышленность, 1962, № 2, с. 35—38.
99. Епифанов П. В., Ковалева Р. И. О вязкости томатопродуктов. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1968, № 11, с. 34—38.
100. Епифанов П. В., Ковалева Р. И. Измерение теплофизических свойств томатопродуктов. — Труды Молдавского НИИ пищевой промышленности «Новые методы технологии и контроля консервного и винодельческого производства», Кишинев, 1972, с. 135—142.
101. Ереско Г. А. Исследование теплофизических свойств и процессов термомеханической обработки сливочного масла с целью создания оборудования для пастеризации и маслообразования. — Автореф. докт. дис. — Л., 1975, с. 8—14.

102. Ереско Г. А., Ряботягова Л. И. Дилатометрический метод исследования отвердевания молочного жира. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1977, вып. 23, с. 61—64.
103. Ермоленко В. Д. Исследование форм связи влаги с пищевыми продуктами методами физических характеристик. — Известия вузов Пищевая технология, 1961, № 1, с. 140, 141.
104. Жидан В. З. Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья. — М.: Пищевая промышленность, 1972. — 154 с.
105. Жидан В. З. Теплофизические основы хранения сочного сырья на пищевых предприятиях. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 238 с.
106. Жидан В. З., А. А. Теплоемкость плодов и овощей. — Известия вузов Пищевая технология, 1964, № 2, с. 121.
107. Жура С. К. Теплофизические свойства паточных растворов. — Сахарная промышленность, 1962, № 3, с. 72—73.
108. Загоруйко В. А., Ковальчук В. И., Кривошеин В. П. Тепло-влажностные характеристики кофе. — Известия вузов Пищевая технология, 1975, № 3, с. 126—129.
109. Зелепуга А. С., Шейман В. А. Исследование теплофизических свойств некоторых влажных пищевых кристаллических дисперсных материалов. — В кн.: Исследование процессов переноса в аппаратах с дисперсными системами. — Минск: Наука и техника, 1969, с. 58—62.
110. Зельцер Я. В., Калита Е. Г. Определение состава водно-спиртово-сахарных растворов по их плотности. — Ферментная и спиртовая промышленность, 1971, № 7, с. 10—13.
111. Зиракидзе Ю. Г. Определение теплофизических параметров чая. — В сб.: Чай, культура и производство, 1967, № 1 [7], с. 57—64.
112. Ильин А. К., Сгребный И. А. Теплофизические характеристики дальневосточных пород рыб. Применение ИК-техники в пищевых отраслях промышленности (тезисы докладов). — М., 1973, с. 109, 110.
113. Илюхин В. В. Исследование теплопроводности в вакууме мяса, высушенного методом сублимации. Всесоюз. межвузовская конф. по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. — Одесса, 1969, с. 66, 67.
114. Иников Г. С. Биохимия молока и молочных продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1970. — 317 с.
115. Исследование зависимости удельной теплоемкости сдобных сухарей от температуры/[А. Ф. Булянда, И. М. Кучерук, Б. И. Вербицкий, Э. В. Грищенко]. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1976, № 2, с. 21—23.
116. Исследование удельной теплоемкости говядины и поджелудочной железы крупного рогатого скота/[Н. А. Александрова, В. В. Макаров, В. П. Латышев, В. М. Орловский]. — Холодильная техника, 1976, № 7, с. 31—34.
117. К вопросу о расчете теплофизических характеристик молока и сливок/[А. Н. Липилкин, С. И. Ноздрин, В. В. Зотов, Н. Д. Михайлов]. — Молочная промышленность, 1976, № 11, с. 22—24.

118. *Кириевский Б. Н.* Аэродинамика пищевого слоя при сушке пищевых материалов. — Известия вузов Пищевая технология, 1962, № 6, с. 109—115.
119. *Книга А. А., Кохановский Н. И., Харин С. Е.* Теплопроводность некоторых пищевых продуктов. — Известия в Пищевой технологии, 1967, № 2, с. 161, 162.
120. *Козьмина Е. П., Троицкая Е. Я.* Влияние длительности замачивания на физико-механические свойства круп. — ЦНИИТЭИ Минзаг, серия «Мукомольно-крупяная пром-сть», 1972, № 4, с. 17—21.
121. *Комаров Н. С.* Справочник холодильщика. — М.: Машгиз, 1962. — 419 с.
122. *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим. — М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. — 408 с.
123. *Корнарики В. Р., Рыва Н. В., Синявская М. К.* Измерение теплофизических характеристик виннокислотной кислоты при сушке. — Известия вузов Пищевая технология, 1976, № 4, с. 86—89.
124. *Коэффициент кинематической вязкости и плотность сгущенного обезжиренного молока* [Л. Лиена, Р. Приеде, П. Паэгле, И. Аргале]. — Труды Латвийской СХА, 1977, вып. 126, с. 3—7.
125. *Краткий справочник физико-химических величин*; под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. — 7-е изд. — Л.: Химия, 1974. — 200 с.
126. *Кретов И. Т., Плешаков А. И.* Изменение физических свойств высушиваемых овощей. — Известия вузов Пищевая технология, 1966, № 4, с. 144—146.
127. *Кудрявцева А. П.* Производство консервированных фруктовых соков. — ЦИНТИпищепром, серия «Консервная и овощесушильная пром-сть», 1964, № 4, с. 8—10.
128. *Кук Г. А.* Пастеризация молока. — М.: Пищепромиздат, 1951. — 238 с.
129. *Латышев В. П.* Исследование удельной теплоемкости и энтальпии свинины. — Холодильная техника, 1975, № 9, с. 42—44.
130. *Латышев В. П., Озерова Т. М.* Удельная теплоемкость и энтальпия топленых говяжьего и свиного жиров. — Холодильная техника, 1976, № 5, с. 37—40.
131. *Лепилкин А. Н., Борисов В. И.* Исследование влияния температуры на теплофизические свойства сливок. — Молочная промышленность, 1967, № 9, с. 35—37.
132. *Лепилкин А., Борисов В.* Термические коэффициенты сливок. — Молочная промышленность, 1966, № 5, с. 12, 13.
133. *Лепилкин А., Борисов В.* Влияние содержания жира на теплофизические свойства сливок. — Молочная промышленность, 1966, № 8, с. 26—30.
134. *Лепилкин А. Н., Ноздрин С. И., Зотов В. В.* Зависимость плотности и теплоемкости сливок от состава и температуры. — Известия вузов Пищевая технология, 1977, № 5, с. 137, 138.
135. *Лебедев Д. П., Перельман Т. Л.* Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме. — М.: Энергия, 1973. — 336 с.
136. *Лиена Л. Р.* Исследование изменения теплофизических свойств и теплоотдачи при сгущении яблочного сока. — Автореф. канд. дис. — Елгава, 1972. — 33 с.

137. *Липатов Н. Н.* Сепарирование молока. — М.: Пищепромиздат, 1960. — 255 с.

138. *Лисовенко А. Т.* Теплофизические характеристики хлебной корки. — В сб.: Хлебопекарная и макаронная промышленность, 1975, № 7, с. 24—29.

139. *Лисовенко А. Т.* Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 213 с.

140. *Магомаева А. А.* Исследование зависимости плотности жира каспийского тюленя от температуры. — Рыбное хозяйство, 1970, № 10, с. 76—78.

141. *Мазур П. Я.* Исследование влияния состава сырья и состояния рабочей окружающей среды на теплофизические свойства хлеба. — Автореф. канд. дис. — Воронеж, 1966. — 22 с.

142. *Мазин П., Вожак Л.* Зависимость теплофизических свойств говядины при посоле от его сорта и влажности. — Мясная индустрия, 1968, № 11, с. 33—35.

143. *Мазур П. Я., Карпенко В. И.* Изменение теплофизических свойств теста для печеных изделий в зависимости от содержания жира и сахара. — Известия вузов Пищевая технология, 1973, № 1, с. 57—61.

144. *Мазур П. Я., Карпенко В. И.* Изменение теплофизических свойств теста-печенья. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1973, № 6, с. 22, 23.

145. *Макавцов М. И.* Теплофизические характеристики некоторых коллоидных тел. — ИФЖ, 1959, № 6, с. 96—99.

146. *Мальский А. Н.* Процесс обжаривания овощей и автоматизация обжарочных печей. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 159 с.

147. *Маслобоев Г. Я., Серегин П. В.* Сушка вареных круп в псевдооживленном слое при производстве пищевых концентратов. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1976, № 6, с. 14—16.

148. *Маслобоев Г. Я., Серегин П. В.* Исследование сушки вареных круп в кипящем слое. — Известия вузов Пищевая технология, 1968, № 1, с. 77—79.

149. *Медведев О. К.* Объединенная номограмма для определения теплофизических свойств томатопродуктов. — Респуб. межвузовский сб. № 2. — Краснодар, 1976, с. 47—50.

150. *Мержанян А. А., Монастырский В. Ф.* О физико-механических свойствах виноградных вин как винодельческого сырья. Известия вузов Пищевая технология, 1973, № 1, с. 17—21.

151. *Метер А. С.* Изменение объемного веса ржаного теста и головок в процессе брожения. — Труды НИИХП, 1951, вып. 4, с. 186—188.

152. *Милчев В. А., Гинзбург А. С., Митрофанов В. П.* Исследование некоторых физических констант паточных растворов. — Труды МТИППа «Процессы и аппараты пищевых производств», 1968, с. 29—34.

153. *Митерев Ю. И., Бородинский В. П., Довгаль Н. Н.* Распределение давления и плотности свекловичного сока при прессовании в открытом канале. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 4, с. 162—164.

154. Мовчан А. А., Жадан В. З. Термические характеристики сахарной свеклы. — Известия вузов Пищевая технология, 1968, № 4, с. 26—28.
155. Моисеев А. М. Исследование процесса теплоотдачи при кипении плодовых соков в тонких пленках. — Автореф. канд. дис. — Краснодар, 1965. — 21 с.
156. Неверов И. Г., Федоров В. Г. Теплоперенос при пастеризации компота из сливы. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1977, № 3, с. 28—30.
157. Нестерова К. П. Физические показатели сырья, полуфабрикатов и макаронных изделий из муки твердых пшениц. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1962, № 2, с. 36—38.
158. Никонов Н. В. Термическое разложение твердого кондитерского жира. — Известия вузов Пищевая технология, 1973, № 3, с. 38—43.
159. Никонов И. В., Твердохлеб Г. В. Теплоемкость и теплота плавления свиного жира. — Известия вузов Пищевая технология, 1977, № 2, с. 28—31.
160. Новаковская С. С., Шишацкий Ю. И. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей. — 2-е изд. — М.: Пищевая промышленность, 1980. — 368 с.
161. Объемная плотность и пористость слоя солода/[В. И. Кулаков, А. М. Гавриленков, В. М. Бильденков, В. Е. Игнатов]. — В сб.: Пивоваренная и безалкогольная пром-сть. М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1974, № 2, с. 15—17.
162. Оленев Ю. А. Исследование действия низких температур на свойство сливочного масла для изыскания рациональных режимов его холодильной обработки и хранения. — Автореф. канд. дис. — Л., 1959. — 18 с.
163. Определение удельной теплоемкости фарша ливерной колбасы высшего сорта в процессе термической обработки/[В. М. Горбатов, В. Н. Масюков, В. Н. Родина, В. И. Еремин]. — Труды ВНИИ мясной промышленности, 1972, т. 26, с. 44—50.
164. О теплофизических характеристиках сахара/[А. Ф. Заборсин, М. К. Смоляр, А. А. Дмитриук, А. М. Флинта]. — Труды НИИ сахарной промышленности, 1975, вып. 24, с. 26—32.
165. О теплоемкости водных растворов винной кислоты/[Т. Л. Парфентьева, Г. Я. Рудакова, В. В. Магомаева, А. С. Магомаев]. — Известия вузов. Пищевая технология, 1972, № 2, с. 59—63.
166. О физико-механических свойствах дрожжей гидролизного производства/[П. Н. Платонов, А. А. Карнаушенко, А. Д. Гмырь, Н. К. Корнев]. — Известия вузов. Пищевая технология, 1972, № 1, с. 99—102.
167. Ошакбаев П. Исследование процесса сублимационной сушки быстрорастворивающегося риса. — Автореф. канд. дис. — М., 1971. — 33 с.
168. Парфенопуло М. Г. Теплофизические характеристики жома. — Сахарная промышленность, 1967, № 3, с. 18—20.
169. Парфенопуло М. Г. Исследование влияния влажности на удельный вес свекловичного жома. — М.: ЦИНТИпищепром, серия «Сахарная и крахмало-паточная промышленность», 1966, № 4, с. 5, 6.
170. Пахомов В. Н., Федоров В. Г., Ереско Г. А. Теплофизиче-

- ские характеристики молочного жира. — Известия вузов Пищевая технология, 1977, № 4, с. 167—171.
171. Пелеев А. И. Определение длительности тепловой обработки мясопродуктов. — Мясная индустрия, 1963, № 6, с. 43—50.
172. Пелеев А. Основное уравнение тепловой обработки мясов. Теплофизические основы процесса. — Мясная индустрия, 1964, № 1, с. 22—25.
173. Пелеев А. И., Бражников А. М. Тепло- и массообмен при термической обработке мяса и мясопродуктов паровоздушной смесью. — М.: ЦИНТИпищепром, 1965. — 63 с.
174. Пелеев А., Бражников А. Теплофизическое обоснование параметров термической обработки колбас с целью автоматизации процесса. — Мясная индустрия, 1967, № 10, с. 30—33.
175. Пелеев А., Бражникова А. Теплофизическое обоснование параметров термической обработки сосисок с целью автоматизации процесса. — Мясная индустрия, 1967, № 11, с. 21, 22.
176. Переверзев В. В. Изучение некоторых теплофизических характеристик круп и приготовленных из них каш применительно к тепловой аппаратуре предприятий общественного питания. — Автореф. канд. дис. — М., 1955. — 26 с.
177. Перельштейн И., Ковалев А. Энтропия и теплоемкость некоторых продуктов кондитерского производства. — Холодильная техника, 1959, № 5, с. 33—36.
178. Писарева В. И. К расчету прогрева плодов. — Известия вузов Пищевая технология, 1966, № 2, с. 160—163.
179. Писарева В. И. Температуропроводность рыбы. — Труды АтлантНИРО, 1965, вып. 14, с. 104, 105.
180. Пойменова И. Б. Зависимость плотности, вязкости и поверхностного натяжения меланжа от его температуры. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 4, с. 141, 142.
181. Попов В. В. Теплофизические свойства некоторых сублимированных продуктов в вакууме. — Труды Мин. рыбн. хоз. 1971, вып. 27, с. 26—30.
182. Попов В. В. Теплопроводность сублимированного мяса креветок в вакууме. — Труды Мин. рыбн. хоз. 1973, вып. 49, с. 62—64.
183. Попов В. В. Определение теплофизических характеристик сублимированных продуктов нестационарными методами. — Известия вузов Пищевая технология, 1974, № 1, с. 128—130.
184. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 320 с.
185. Попов В. Д., Жура С. К. Теплопроводность глюкозных растворов. — Труды КТИППа, 1957, т. 17, с. 115—121.
186. Попов В. Д., Жура С. К. Теплофизические параметры глюкозных растворов. — Труды КТИППа, 1958, т. 9, с. 15—22.
187. Попов В. Д., Терентьев Ю. А., Гончаренко И. И. Физические свойства кристалла сахара. — Известия вузов Пищевая технология, 1966, № 1, с. 127—129.
188. Попов В. Д., Черный А. М. Определение теплофизических параметров продуктов сахарного производства. — М.: ЦНИИТЭИпищепром, серия «Сахарная и крахмало-паточная промышленность», 1960, № 2(10), с. 27—30.

189. Попов В. И., Чеботаренко Н. М. Определение термических коэффициентов ячменного солода методом регулярного режима. — Труды ЛТИППа, 1958, т. 14, с. 58—63.
190. Попов О. А. Исследование теплофизических характеристик сублимированных продуктов. — Труды ВНИИКОП, 1973, № 17, с. 25—29.
191. Постольски Я., Груда З. Замораживание пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1978. — 279 с.
192. Принципы технологии сахара; под ред. П. Хонига. — М.: Пищепромиздат, 1961. — 616 с.
193. Производство и использование рыбного фарша. — М.: ОНТИ ВНИРО, 1969. — 47 с.
194. Проценко А. Н., Семенова Т. И., Мальцев П. М. Состав и физико-химические свойства ячменного и солодового крахмала. — Известия вузов. Пищевая технология, 1974, № 4, с. 43—47.
195. Пучк Л. А. Исследование процесса варки картофеля и пищевых отходов. — Автореф. канд. дис. — Л., 1964. — 15 с.
196. Рил Р. Р. Удельный вес жира молока. — XIV Междунар. конгр. по молочному делу. — М.: ИЛ, 1958, с. 76.
197. Ривкин С. Л., Винникова А. Н. Теплоемкость растворов этилового спирта в воде при 25—50°С. — Теплоэнергетика, 1964, № 6, с. 59—63.
198. Рогов И. А., Горбатов А. В. Новые физические методы обработки мясопродуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1966. — 302 с.
199. Родин В. Н., Еремин В. И. Определение средней удельной теплоемкости жиров в процессе их плавления. — М.: ЦНИИТЭИ Минмясомолпрома, 1971, вып. 12, с. 23—26.
200. Родин В. Н., Еремин В. И. Определение удельной теплоемкости обезжиренного мяса. — М.: ЦНИИТЭИ Минмясомолпрома, серия «Мясная промышленность», 1974, № 4, с. 28—32.
201. Родин В. Н., Еремин В. И. Определение удельной теплоемкости животных жиров в зависимости от температуры нагревания. — М.: ЦНИИТЭИ Минмясомолпрома, серия «Мясная промышленность», 1975, № 5, с. 10—14.
202. Родин В. Н., Еремин В. И. Удельная теплоемкость фарша ливерной колбасы I и III сорта. — ЦНИИТЭИ Минмясомолпрома, серия «Мясная промышленность», 1975, № 1, с. 8—12.
203. Ройтер И. М., Коваленко А. Я. Изменение удельного объема теста на разных стадиях технологического процесса. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1959, № 3, с. 10—13.
204. Рубаник В. В. Исследование теплофизических характеристик мясных фаршей. — Автореф. канд. дис. — Киев, 1970. — 23 с.
205. Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров. — ВНИИЖ, 1961, т. 3. — 464 с.
206. Савина Н. Я. Исследование процесса высокотемпературной обработки некоторых пищевых продуктов в масле. — Автореф. канд. дис. — Одесса, 1966. — 20 с.
207. Савина Н. Я. Теплофизические характеристики сырых и обжаренных овощей. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1969, № 4, с. 15—17.
208. Санько Ю. П., Слепцов В. А. Определение теплоемкости и теплот испарения молока и сливок при низких давлениях. — ИФЖ, 1977, № 1, с. 126—130.

209. Сборник задач и расчетов по теплопередаче/[Г. Н. Данилова, В. Н. Филаткин, Р. Г. Черная, М. Г. Щербаков]. — М.: Госторгиздат, 1961. — 271 с.

210. Сребный И. А., Ильин А. К. О влиянии способа удаления влаги на теплопроводность мышечной ткани рыбы. — Труды УУЗ Минрыбх, 1973, т. 52, с. 76—78.

211. Сидоренко, Д. И. Исследование режимов прессования и предварительной обработки дикорастущих ягод с целью оптимизации процесса получения сока. — Автореф. канд. дис. — М., 1974. — 30 с.

212. Синат-Радченко Д. Е., Попов В. Д. Удельный объем сахараторов. — Реферат. инф. о законченных НИР в вузах. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1974, вып. 9, с. 6.

213. Синат-Радченко Д. Е., Попов В. Д. Энтальпия сахарных растворов и утфелей. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1974, вып. 18, с. 85—87.

214. Смагин Ю. И. Определение теплофизических коэффициентов рыбных кулинарных изделий. — Труды ПИНРО, 1975, вып. 36, с. 223—240.

215. Сонз Т., Окада М., Фукушима М. Физические свойства масла, выработанного различным способом. — XVII Международный конгресс по молочному делу. — М.: Пищевая промышленность, 1971, с. 134—140.

216. Справочник по сырью, полуфабрикатам и готовым изделиям кондитерского производства/[М. Я. Антокольская, И. И. Бронштейн, М. И. Мартынов и др.]. — М.: Пищевая промышленность, 1964. — 230 с.

217. Стабников В. Н., Ройтер И. М., Процюк Т. Б. Этиловый спирт. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 272 с.

218. Стефановская Н. Р. Теплофизические свойства щучьей икры. — Известия вузов. Пищевая технология, 1974, № 4, с. 158, 159.

219. Стецюк В. Е. Коэффициент переноса тепла тростникового сахара-сырца. — ИФЖ, 1963, № 4, с. 86—87.

220. Субботин В. А., Попов В. П. К вопросу о теплофизических свойствах винограда и продуктов его переработки. — Труды ВНИИ виноделия и виноградарства, 1967, т. 15, с. 36—51.

221. Субботин В. А., Тюрин С. Т., Валушко Г. Г. Физико-химические показатели вина и виноматериалов. — М.: Пищевая промышленность, 1972. — 160 с.

222. Суздалкин А. С., Лерман Н. Д. Определение плотности сыпучих материалов при помощи изотопов. — Труды ВНИИзерна, вып. 80, 1975, с. 110—114.

223. Сыроедов В. И., Бережинская А. Б. Теплофизические характеристики сахара-песка. — Сахарная промышленность, 1975, № 10, с. 29—31.

224. Теплопроводность газов и жидкостей/[Н. Б. Варгафтик, П. П. Филиппов, А. А. Тарзيمانов, Р. П. Юрчак]. — Госкомитет по стандартам, 1970. — 154 с.

225. Теплофизические параметры слоя чайного листа/[В. И. Гомелаури, А. И. Мухелишвили, А. Т. Хоштария, О. Ш. Везиришвили, Г. З. Хечуашвили]. — Холодильная техника, 1976, № 2, с. 26—28.

226. Теплофизические свойства влажной шквары/[В. П. Федоров, Б. П. Шубенко, В. М. Ельченко, А. Н. Оливская, В. И. Со-

сновский]. — Реферат. инф. о законченных НИР в вузах

В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1973, вып. 7, с. 41, 42.

227. *Теплофизические свойства зернистой черной икры* / [В. М. Стефановский, А. В. Стефановская, В. В. Самойлов]. — Известия вузов пищевая технология, 1968, № 2, с. 98—100.

228. *Терентьев Ю. А., Попов В. Д.* Теплофизические свойства некоторых продуктов свеклосахарного производства. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1965, № 2, с. 61—68.

229. *Теплофизические характеристики макаронного теста* / [А. С. Гинзбург, Н. И. Назаров, Г. В. Цивцивадзе и др.]. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1976, № 3, с. 32—33.

230. *Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов* / [А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская, В. С. Уколов]. — М.: Пищевая промышленность, 1975. — 223 с.

231. *Теплофизические характеристики порошкообразного курузного экстракта* / [А. А. Михайленко, В. А. Коваленко, Л. К. Михайленко, Ю. В. Космодемьянский, А. С. Гинзбург]. — Сахарная промышленность, 1977, № 2, с. 62.

232. *Технология рыбных фаршей из маломерных рыб.* — М.: ВНИРО, 1972. — 94 с.

233. *Титов А.* Удельный вес масла и содержание в нем воздуха. — Молочная промышленность, 1953, № 7, с. 46—47.

234. *Товбин И. М., Файнберг Е. Е.* Технологическое проектирование жироперерабатывающих предприятий. — М.: Пищепромиздат, 1959. — 399 с.

235. *Топорин Н. И.* Исследование зависимости объемного веса теста от давления. — Труды ВНИИХПа, 1951, вып. 4, с. 178—185.

236. *Федоров В. А., Шишацкий Ю. И.* О теплофизических характеристиках дрожжевых заводов. — Известия вузов Пищевая технология, 1975, № 3, с. 189, 190.

237. *Федоров В. Г., Декуша Л. В.* Измерение теплофизических характеристик пищевых продуктов в процессе их обработки. — В сб.: Пищевая промышленность. Киев, 1976, № 22, с. 55—58.

238. *Федоров В. Г., Дорохович А. Н., Бондаренко Е. Г.* Теплофизические характеристики бисквитных полуфабрикатов. — Реферат. инфр. о законченных НИР в вузах УССР. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1975, вып. 10, с. 29—30.

239. *Федоров В. Г., Рябцев В. В., Неверов И. Г.* Теплофизические характеристики вишни. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1975, № 9, с. 22—24.

240. *Федоров В. П., Пахомов В. Н.* Исследование теплоемкости жира. — Реферат. инф. о законченных НИР в вузах. — В сб.: Пищевая промышленность, Киев, 1975, вып. 10, с. 57—58.

241. *Федоров И. Н.* Исследование и обоснование технологических и теплообменных характеристик электрических фритюрниц периодического действия. — Автореф. канд. дис. — М., 1975. — 30 с.

242. *Федоров Н.* Сваривание мяса в металлическом цилиндре. — Мясная индустрия, 1967, № 11, с. 36—37.

243. *Федоров Н.* Кинетика термической обработки колбасных изделий в зависимости от диаметра батона. — Мясная индустрия, 1969, № 4, с. 36.

244. Федоров Н., Горбатов А., Рогов И. О нестационарном тепловом режиме при движении фарша в трубах. — Мясная индустрия 1962, № 1, с. 50—51.
245. Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясopодуlктов; под ред. А. А. Соколова. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 495 с.
246. Филиппов В. И., Фролов В. Л. О применении методов регулярного режима для определения теплофизических характеристик пищевых материалов. — В кн.: Холодильная обработка и хранение пищевых продуктов. Краснодар, 1976, с. 146—152.
247. Фромзель О. Г. Исследование свойств томатной пасты в связи с ее асептическим консервированием и хранением в крупных резервуарах. — Автореф. канд. дис. — М., 1974. — 31 с.
248. Харин С. Е., Книга А. А. Водно-спиртoво-сахарные растворы. — Известия вузов пищевой технологии, 1964, № 3, с. 60—65.
249. Харин С. Е., Книга А. А., Кохановский Н. И. Физико-химические и теплофизические свойства водно-спиртoво-сахарных растворов. — Ферментная и спиртовая промышленность, 1966, № 2, с. 6—9.
250. Хачатуров А. Тепловые процессы при замораживании рыбы в потоке воздуха. — Доклады отчета научной конференции комиссий III, IV, V Международного института холода. М., 1958, с. 99—114.
251. Хелемский М. З., Жадан В. З. Теплопроводность нормального свеkловиlчного сока. — Труды ВНИИ сахарной промышленности, 1964, вып. 10, с. 11—13.
252. Холодильная техника (энциклопедический справочник). — М.: Госторгиздат, 1961, т. 2. — 565 с.
253. Хорошая Э. Физико-механические свойства муки при различных условиях хранения. — Мукомольная и элеваторная промышленность, 1968, № 11, с. 25—27.
254. Цюта В. И., Кайхчешвили А. И., Илюхин В. В. Теплопроводность измельченного сухого мяса в вакууме. — Тезисы докл. конф. молодых специалистов ин-та по итогам научно-исслед. работ. — МТИММП, 1972, с. 137—139.
255. Чеботаренко Н. М. Экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности жидких продуктов пивоварения и расчетные зависимости коэффициента теплопроводности продуктов от их состояния. — Труды ЛТИППа, 1958, т. 14, с. 95—101.
256. Чекулаева Л. В. Изменение плотности сливок в зависимости от их жирности и температуры. — Труды Вологодского молочного ин-та, 1953, т. 12, с. 233—236.
257. Черенков А. И. Исследование некоторых теплофизических характеристик пищевых продуктов и новых промежуточных теплоносителей для тепловых аппаратов предприятий общественного питания. — Автореф. канд. дис. — М., 1964. — 17 с.
258. Чернеева Л. Экспериментальное исследование тепловых свойств вни. — Холодильная промышленность, 1957, № 1, с. 50—52.
259. Чижов Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1979. — 269 с.

260. Чубик Н. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. — М.: Пищевая промышленность, 1970. — 184 с.

261. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. — М.: Госиздат физ.-матем. лит., 1962. — 456 с.

262. Щеколдин М. И., Бигельман Б. С. Экспериментальное определение удельной теплоемкости мятки, ядра и шелухи хлопковых семян. — Труды ВНИИЖа, 1969, вып. 20, с. 137—144.

263. Янкелев Л. Ф. Метод определения термических коэффициентов материалов и тепловой изоляции без отбора проб. — Автореф. канд. дис. — М., 1953. — 16 с.

264. Янков С. И. Изменение физических свойств яблок и груш при бланшировании. — Консервная и овощесушильная промышленность, 1961, № 11, с. 41—44.

265. Яроцкий В. Г. Исследование процесса получения поваренной соли из рассолов в распылительных сушилках. — Автореф. канд. дис. — М., 1969. — 30 с.

266. Дущенко В. П., Андрианов В. М. Про теплофизични властивості вологого картопляного крохмалю при відємних температурах. — Харчова промисловість, 1972, № 15, с. 56—59.

267. Синат-Радченко Д. Е., Попов В. Д. Теплоємність цукрових розчинів в утвєлів. — В сб.: Харчова промисловість, 1973, вып. 17, с. 17—19.

268. Синат-Радченко Д. Е. Густина цукрових розчинів та утвєлів. — В сб.: Харчова промисловість, 1973, вып. 16, с. 16.

269. Гегов Я., Каров Т. Определение темпа на охлаждане на полуизпържени картофи, преназначени за замразяване. — Научни трудове НИИ по консервна промишленост, Пловдив, 1974, т. 11, с. 51—66.

270. Изследване на влияние то на водного съдържание и мазнините върху топлофизичните свойства на пълнежната масла за варени малотрайни колбаси./[Г. Игнатов, К. Костов, К. Виднев, И. Пионов]. — Научни трудове Висш. инст. хранит. и вкус. пром., Пловдив, 1973 (1974), т. 20, № 2, с. 359—367.

271. Илиев П., Коларов К., Карадимов Д. Изследване на някои физични свойства на плодовите сокове. — Труды Инстит. пищев. и вкус. промышленности, Пловдив, 1969, т. 7, с. 269—281.

272. Кафкджиев И., Видев К. Определяне на времето за заграбана на някои плодове при използване на технологията за горещо пълнене. — Научни трудове НИИ по консервна промишленост, Пловдив, 1976, т. 12, с. 19—35.

273. Коларов К. Температуропроводност на някои млечни продукти. — Научни трудове Висш. инст. хранит. и вкус. пром., Пловдив, 1962, т. 15, № 1, с. 217—229.

274. Коларов К. Изследване на теплофизичните и реологичните характеристики на домати концентрати. — Автореф. канд. дис. — Пловдив, 1973. — 26 с.

275. Коларов К., Громов М. А. Охлаждение и заграване на кутин с доматиено пюре при различни условия. — Български плодове зеленчуци и консерви, 1971, № 2, с. 11—15.

276. Коларов К., Громов М. А. Универсално уравнение за изчисляване топлопроводността на плодови и зеленчукови сокове и сиропи. — Хранителна промишленост, 1973, № 10, с. 33, 34.

277. Костов К., Пионов И., Коларов К. Влияние на влагата в пълнежната масла върху топлинната на верените малотрайни колбаси. — Научни трудове Висш. инст. хранит. и вкус. пром., Пловдив, 1964, т. 16, № 1, с. 75—87.
278. Костов А. Графично определение на коефициента на температуропроводности при охлаждане на твърди хранителни продукти. — Научни трудове Висш. инст. хранит. и вкус. пром., Пловдив, 1973, т. 20, № 1, с. 295—300.
279. Милчев В., Железков И., Тодоров Т. Експериментано изследване на някои физически константи на вината. — Лозарство и винарство, 1969, № 4, с. 24—29.
280. Милчев В., Мисалев Г., Тодоров Т. Изследване на някои термодинамични и топлинни параметри на вина. — Лозарство и винарство, 1969, № 5, с. 24—29.
281. Милчев В., Михалев Г. Изследване на някои физически характеристики на коняк «Плиски». — Лозарство и винарство, 1970, т. 19, № 1, с. 24—27.
282. Невенкии С., Сендов С., Колев Н. Теплофизични характеристики на ябълки. — Научни трудове по теплотехника Висш. техн. учеб. завед., София, 1972, т. 1, с. 173—178.
283. Странжев А., Коларов К., Кузманова Е. Изследване на някои физични на сок от различни сортове ябълки. — Труды Академия на селскостопанските наук, София, 1970, т. 7, № 8, с. 21—27.
284. Тодоров Т., Сендов С., Гудев А. Експериментално определяне на тепло- и масоперенасяне на картофи. — Научни трудове Висш. техн. учеб. завед., София, 1973, т. 1, с. 147—157.
285. Фишкин А., Коларов К. За теплофизичните характеристики на някои хранителни продукти. — Хранителна промишленост, 1974, т. 23, № 9, с. 37—40.
286. Цветков Ц. Теплопроводимост на някои хранителни продукти. — Хранителна промишленост, 1972, т. 21, № 4, с. 27, 28.
287. Adam M., Balcar V., Oktabec Z. Někteř tepelně fyzikální vlastnosti potravin. — Pruměsli potravin; 1964, N 9 u 10, s. 1—24. (priloha).
288. Adam M., Havlicek Z. Pyzikální vlastnosti potravin. — Zemledelska technika, 1968, v. 14, N 5, s. 301—310.
289. *Advances in Food Research.* — Academic Press, N-Y., 1948—1971, v. 17, 300 p.
290. Almási E. Nehány elemiszer hoilezetesci tenyezöyenen meyhatarozasa. — A konzeri, Hills es Hütö ipori kutoto intizet kozlemenyu, 1958, v. 1—II, 41—51.
291. Annamma T. T., Rao C. V. Studies on thermal diffusivity and conductivity of fresh and dry fish. — Fishery technology; 1974, v. II, N 1, p. 28—33.
292. Bailey A. E. Industrial Oil and Fat products. — «New York Intersci publ. indus», 1951.
293. Baloh T. Enthalpidiagramm für, Zucker — Wasser — Lösungen. — Zucker, 1962, v. 15, N 17, s. 444—451.
294. Baloh T. Exergetische Untersuchungen in der Zuckerindustrie. — Zucker, 1963, v. 16, N 8, s. 194—202.
295. Becker K., Bauermister J. Wärmeinhalt und spezifische Wärme von Kakaobutter, Schokoladen und Kuverturen bei verschidenen Temperaturen. — Fette, Seifen, Anstrichmittel, 1967, v. 69, N 8, s. 593—597.

296. *Bennett A. H.* Thermal characteristics of Peaches as Related to hydrocooling. — U. S. Dep. of Agriculture. Techn. Bull., № 1292, 1963, pp. 1—30.

297. *Bennett A. H., Chace W. G., Cubbedge R. H.* Estimating Thermal Conductivity of Fruit and Vegetable Components — the Fitch Method. — ASHRAE Journal, 1962, v. 4, № 9, p. 80—85.

298. *Bennett A. H., Chace W. G., Cubbedge R. H.* Thermal Conductivity of Valencia orange and Marsh grapefruit rind and juice vesicles. — Transactions of American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1964, v. 70, p. 256—259.

299. *Bennett A. H., Cubbedge R. H.* Thermal Properties and Heat Transfer Characteristics of Marsh Grapefruit. — Technical Bulletin U. S. Department of Agriculture, 1970, N 1413, p. 1—29.

300. *Berlin E., Kliman P. G., Pallansch M. J.* Surface Areas and Densities of Freeze—Dried Foods. — Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1966, v. 14, N 1, p. 15—17.

301. *Beek G V.* Heat Transfer Through Iaxers of Agricultural Products of near Spherical Shape. Science et Technique du froid Refrigeration science and Technology. 1974. p. 183—188.

302. *Bubnik Z., Kadlec P.* Hustota koncentrovanych cukrernych roztoku. — Listy cukrovarnicke, 1977, v. 93, N 7, s. 159—166.

303. *Buma T. J.* The Physical structure of spray Milk powder and the Changes which take place during moisture absorption. — Netherlands Milk-en Zuiveltydchrift, 1966, v. 20, N 2, p. 91—112.

304. *Buma T., Meerstra J.* The specific heat of Milk powder and of Some Related Materials. — Nederlands Milk and Dairy Journal, 1969, v. 23, N 2, p. 124—127.

305. *Cakebread S. H.* Confectionery Ingredients specific gravity of carbohydrate Solutions. — Confect. Prod. 1974, v. 40, N 9, p. 392—395.

306. *Calculation and Measurement of Heat Transfer in Foods.* Roger W., Dickerson J., Ralston B., Read J. Food Technology, 1968, v. 22, N 12, p. 37—39, 49, 51, 52.

307. *Charm S. E.* The fundamentals of Food Engineering. — Avi Publishing Co, Westport, 1963, p. 146.

308. *Chaudhny M. A., Glew G.* The Effect of ionizing radiations on some physical and chemical properties of Pakistani rice. — Journal of Food Technology, 1973, v. 8, p. 295—303.

309. *Chen A. C., Heldman D. R.* An Analysis of the Thermal Properties of Dry Food Powder in a Packed Bed. — Trans. of the ASAE, 1972, v. 15, N 5, p. 951—955.

310. *Comini G., Bonacina C., Barina S.* Thermal properties of Foodstuffs. — Bull. Institut Internatio. du Froid, 1974, annexe 3, p. 163—170.

311. *Conochie V., Dubout P., Howard V.* The Thermal Conductivity of Butter and Cheese. — Australian Journal of Dairy Technology, 1964, v. 19, N 2, p. 90.

312. *Czerniawicz J., Gayewski A., Steplewska J.* Giezar wtasciwy zeimniakow a ich skrobiowosc. — Pizemysl fermentacyjny i rolny, 1976, N 2, s. 18—22.

313. *Deymek P., Anas A.* Heat and mass transfer to milk in PE-lined cartons Milchwissenschaft, v. 32, 1971, N 7, p. 391—394.

314. *Dickerson R. W., Read R. B.* Cooling Rates of Foods. — Journal of Milk and Food Technology, 1973, v. 36, N 3.

315. *Dixit R. N., Qadav P. Z., Roy N. K.* Density of buffalo milk fat. — *Milchwissenschaft*, 1971, v. 26, N 10, p. 625—628.
316. *Dluzewski M., Skrzypek J.* Fizykochemiczna i mikrobiologiczna charakteryka tuka proszku mleczegona tle technologii stosowany w rolnich zakładach przemysłowych. — *Zesz. nauk SGGW, Warszawa, Technol. rolno-spożyw.*, 1970, N 6, 91—107.
317. *Drachovska H., Hrubisek J., Sandera K.* Potravinarske tabulky, Praha, 1952, 142s.
318. *Dua K. K., Oyha T. P.* Measurement of Thermal Conductivity of Paddy Grains and its by-products. — *Journal Agricultural Engineering Research*, 1969, N 14, N 1, p. 11—17.
319. *Enthalpie* — Konzentrationen. — Diagramm für mageres Rindfleisch. — *Kältetechnik*, 1957, v. 9, N 2 (приложение).
320. *Flemina A. K.* Calorimetric properties of lamb and other meats. — *Journal of Food Technology*, 1969, v. 4, N 3, p. 199—215.
321. *Fernandez — Martin F.* Properties of Milk and Milk concentrates. I. Heat capacity. — *Journal of Dairy Research*, 1972, v. 39, N 1, p. 65—73.
322. *Fernandez-Martin F., Montes F.* Properties of Milk and Milk concentrates. III. Thermal conductivity. — *Milchwissenschaft*, 1972, v. 27, N 12, p. 772—776.
323. *Fernandez-Martin F., Montes F.* Thermal conductivity of Creams. — *Journal of Dairy Research*, 1977, v. 44, N 1, p. 103—109.
324. *Fito P., Pinaga F., Aranda V.* Difusividad termica de alimentos liofilizados. — *Revista de agrogulmica y tecnologia de alimentos*, 1974, v. 14, N 3, p. 409—415, 363—364, 368, 372.
325. *Fraser B. W.* Apparent Density of Sausage Meats. — *Food Technology*, 1954, v. 8, N 7, p. 341, 342.
326. *Casimir D. J., Mitchell R. S., Moyer J. C.* A Simple Method for Determining the Specific Gravity of Foods. — *Food Technology*, 1967, v. 21, N 7, p. 1042, 1043.
327. *Harper J. M.* An Apparatus for Measuring Bulk Density of Dried Milk — *Food Technology*, 1962, v. 12, N 9, p. 144.
328. *Harper J. C., Sahrgi A. F.* Thermal Conductivities of gas-filled porous Solids. — *Industrial Engineering Chemistry Fundamentals*, 1964, v. 3, N 3, p. 318—324.
329. *Harris S., Mc. Donald B.* Physical data for kiwifruit. — *New Zealand Journal of Science*, 1975, v. 18, N 3, p. 307—312.
330. *Haswell G.* A note on the Specific heat of Rice Oats and their Products. — *Cereal Chemistry*, 1954, v. 31, N 4, p. 341, 342.
331. *Helvey T. C.* Study on some physical properties of Honey. — *Food Research*, 1954, v. 19, N 3, p. 282—292.
332. *Henderson S. M.* On the Farm Egg Processing. — *Agricultural Engineering*, 1957, v. 38, N 8, p. 598—601.
333. *Henderson S. M.* Thermal Conductivity, Generalized Cooling Procedure and Cooling in Water. — *Transactions of the ASAE*, 1963, v. 6, N 2, p. 95—97.
334. *Higgs S. J., Swift S. P.* Investigation into the Thermal Conductivity of Beef using the line source technique. — *Process. Biochemistry*, 1975, v. 10, N 10, p. 43—45.
335. *Hill J. E., Leitman J. D., Sunderland J. E.* Thermal Conductivity of Various Meats. — *Food Technology*, 1967, v. 21, N 8, p. 91—96.

336. *Hill J. E., Sunderland J. E.* Equilibrium Vapor Pressure and Latent Heat of Sublimation for Frozen Meats. — *Food Technology*, 1967, v. 21, N 9, p. 112—114.
337. *Holme R. W., Coey W. E., Robinson L. L.* The Prediction of Pig Carcass Composition from measurements of Carcass density. — *The Journal of Agricultural Science*, 1963, v. 61, par. 1, p. 9—18.
338. *Horwicz H., Tischer R. G.* Heat processing of Beef. — *Food Research*, 1956, v. 21, № 2, p. 147—155.
339. *Hosoka W. A., Sasahara S.* Thermal Conductivity of Meats and Fats. — *Journal Soc. Agr. Mach. Jap.*, 1971, v. 33, N 3, p. 298—303.
340. *Havlicek Z., Adam M.* Teplotova vodivost masnych vyrobku. — *Průmysl Potravin*, 1970, v. 21, M 10, s. 300—35.
341. *Ilyasov S. C., Krasnikov V. V., Krasovskay G. J.* Kompleksni vyzkum tepelne fuzikalich a optickych vlastnosti potravin. — *Zemledelska technika*, 1977, v. 23, N 2, s. 75—84.
342. *Iliescu G. M.* Constante termofizice ale principalelor produse alimentare Bucuresti, Editura tehnica, 1971, 186.
343. *Jarvis H. F.* The Thermal variation of the Density of Beef and the Determination of its coefficient of Cubical expansion. — *Journal of Food Technology*, 1971, v. 6, N 4, p. 383—391.
344. *Kethley T. W., Cown W. B., Bellinger F.* An Estimate of Thermal Conductivities of Fruits and Vegetables. — *Refrigeration Engineering*, 1958, v. 58, N 1, p. 49, 50.
345. *King C. J., Lam W. K., Sandall O. C.* Physical Properties Important for Freeze—Drying Poultry Meat. — *Food Technology*, 1968, v. 22, N 10, p. 100—106.
346. *Kirschbaum E.* Der Wärmeübergang im senkrechten Verdampferrohr. — *Chemie — Ingenieur. Technik*, 1955, N 5, p. 248.
347. *Klein S.* Nektere vlastosti masa vyzamne u technologi, Praha, 1963, s. 146.
348. *Konrad H., Rambke K.* Physikalisch Eigenschaften flüssiger Milch produkte, — *Nahrung*, 1971, Bd. 15, N 3, s. 269—277.
349. *Konrad H., Rambke K.* Untersuchung über die wärmetechnischen Eigenschaften von Quark. — *Nahrung*, 1972, Bd. 16, N 5, s. 467—471.
350. *Kopelman I. J., Mizrahi S., Kaufmann J.* Thermal conductivity in transient cooling of Oranges. — *Bull. Inst. intern. froid*, 1973, Aunex N 3, p. 223—229.
351. *Kostaropoulos A. E.* Die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit getrockneter Lebensmittel. — *Diss. Karlsruhe*, 1971, s. 128.
352. *Kostaropoulos A. E.* Die Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen gefriergetrockneter Lebensmittel. — *Lebensmittel — Wissenschaft — Technologie*, 1975, Bd. 8, N 5, s. 202—205.
353. *Kostaropoulos A. E., Spiess W. E., Wolf W.* Anhaltswerte für die Temperatur leitfähigkeit von Lebensmitteln. — *Lebensmittel — Wissenschaft — Technologie*, 1975, Bd. 8, N 3, s. 108—110.
354. *Krouzilova L., Budicek L.* Príspevek kmereni fyzikalnich vlastnosti kapalných a testovitych materialu. *Potravinarska a chladicí technika*, 1972, N 5, s. 138—142.
355. *Kuprianoff.* Problemy prestupu tepla pri Zpracovani potravin. — *Průmysl potravin*, 1966, N 4, s. 203—210.
356. *Kulev K., Havlicek Z., Adam M.* Tepelna vodivost testa a vyrobku trvanliveho peciva. — *Průmysl Potravin*, 1971, v. 22, N 5, s. 65—69.

357. Kutev K., Havlicek Z., Drabkova J. Merchi tepelne fyzikalnich vlastnosti karotky. — Průmysl Potravin, 1972, v. 23, N 2, s. 47—49.
358. La Bello R. L. Bulk Density — A. Versatile Measure of Food Texture and Bulk. — Food Technology, 1964, v. 18, N 6, p. 45—50.
359. Lamb F. C. Relation Between Refractive Index, Specific Gravity and Total Solids of Tomato Juice, Puree and Paste. — Journal of the Association of Official Analytical, 1967, v. 50, N 3, p. 690—700.
360. Langner G. Experimentelle Kontrolle des Enthalpie diagramms für Zucker — Wasser — Lösungen von Baloh — Zeitschrift für die Zuckerindustrie, 1963, Bd. 13, N 12, s. 676—678.
361. Levy F. L. Zur theorie der Fleischkühlung. — Kältetechnik. Klimatisierung, 1972, Bd. 24, N 4, s. 85—98.
362. Löwer H. Ein Kalorimeter zur bestimmung der Spezifischen warme von flüssigkeiten. — Kältetechnik, 1963, Bd. 15, N 1, s. 2—5.
363. Lusk G., Karel M., Goldblith S. A. Thermal Conductivity of Some Freeze — Dried Fish. — Food Technology, 1964, v. 18, N 10, p. 121—124.
364. Magnussen O. M. Measurements of heat and mass transfer Coefficients during freeze-drying. — Bull. Institut Interna. froid, 1969, v. 49, Annexe N 4, p. 65—74.
365. Massey W. M., Sanderland J. E. Measurement of thermal Conductivity During Freeze. Drying of Beef. — Food Technology, 1967, v. 21, N 3, p. 408—411.
366. Mc Dowell A. K. R. The properties of New Zealand Butters and Butterfats. The Journal of Dairy Research, 1954, v. 21, N 3, p. 383—390.
367. Mennicke U. Zwei einfache Verfahren zur genauen Bestimmung der Dichte von festen Butterfett. — Zeitschrift für Lebensmittel — Untersuchung und Forschung, 1972, N 4, p. 232—240.
368. Miller H. L., Sanderland J. E. Thermal Conductivity of Beef. — Food Technology, 1963, v. 17, N 4, p. 124—126.
369. Mohsenin N. N. Physical properties of plant and animal materials. — Structure physical characteristics and mechanical properties. 1970, v. 1, p. 734.
370. Mori K., Hedrick T. J. Some properties of instantized dry Milks. Journal of Dairy Science, 1965, v. 18, N 2, p. 253—256.
371. Müller G. E. Enthalpie — Konzentrations — Diagramm für das Fleisch von mageren Seefischen. — Kältetechnik, 1960, Bd. 12, N 4, DKU. Arbeitsblatt 8—18.
372. Müller C. F. Enthalpie — Konzentrations Diagramm für Kartoffelstärke. — Kältetechnik, 1960, Bd. 12, N 12, DKV Arbeitsblatt 8—19.
373. Neumann W. Das Gefrieren und die Gefrierlagerung von Backwaren. — Kältetechnik, 1958, Bd. 10, N 2, p. 57—63.
374. Oyha T. P., Farrall A. W., Dhanak A. M. A Method of Determining Heat Transfer through Powdered Food Products. — Transactions of the ASAS, 1967, v. 10, N 4, p. 543—545.
375. Oktabec Z., Ambros F. Vyzkum tepelne-fyzikalnich Vlastnosti potravin. — Průmysl Potravin, 1965, v. 16, N 5, s. 220—224.
376. Palaniappan S. Effect of Temperature on Thermal Conductivity of Milk. — Journal of Institution of Engineers, 1975, v. 56, N 1, p. 4—6.
377. Persson P. O., Borghult P., Nilsson T. Technik und Wirtschaftlichkeit des Tiefgefrieren von Lebensmitteln. — Die Kälte, 1965, Bd. 8, N 4, s. 190—196.

378. *Perry J. A.* Relates Density to Solids. — Food Engineering, 1971, v. 43, N 5, p. 78, 79.
379. *Phipps L. W.* A calorimetric study of Milk, Cream and the Fat in Greem. — Journal of Dairy Research, 1957, v. 24, N 1, p. 51—67.
380. *Physical constants of cocoa powder and cocoa butter* — Confect Prod 1971, v. 37, N 7, p. 425, 426, 433.
381. *Plank P.* Handbuch der Kältetechnik, Berlin, 1960, s. 567.
382. *Piyanowski,* Factors influencing gas contents in fresh milk. — Acta alimentaria polonica, 1975, v. 1, N 1, p. 78—92.
383. *Pohlman W.* Taschenbuch für Kältetechnik. Hamburg, 1956, s. 596.
384. *Poy N. K.* Density of casein from buffalo milk. — Milchwissenschaft, 1968, v. 23, N 12, s. 741—743.
385. *Pym R. A. S.* A suspension weighting technique for the rapid determination of specific gravity of Eggs. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, 1969, v. 9, p. 131—134.
386. *Rambke K., Konrad H.* Spezifische Wärmekapazität von Milch, Rahm und Milchkonzentaten. — Die Nahrung, 1970, v. 14, N 6, s. 475—483.
387. *Rambke K., Konrad H.* Physikalisch Eigenschaft der flüssiger Milchprodukte. — Die Nahrung, 1970, v. 14, N 2, s. 137—143.
388. *Rambke K., Konrad H.* Untersuchungen über die Dichte von Quark. — Die Nahrung, 1972, v. 16, N 5, s. 461—466.
389. *Rha C.* Thermal properties of Food Materials. — (Series in Food Materials) Boston, 1975, N 1, p. 414.
390. *Riedel L.* Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Kältetechnisch wichtigen Salzlösungen. — Kältetechnik, 1950, Bd. 2, N 4, s. 99.
391. *Riedel L.* Die Kältebedarf beim Gefrieren von Obst und Gemüse. — Kältetechnik, 1950, Bd. 2, N 8, s. 195—202.
392. *Riedel L.* Kalorimetrische Untersuchungen über das Schmelzverhalten von Fetten und Ölen. — Fetten, Siefen, Anstrichmittel, 1955, Bd. 57, N 10, s. 771—782.
393. *Riedel L.* Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Seefischen. — Kältetechnik, 1956, Bd. 8, N 12, s. 374—377.
394. *Riedel L.* Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Eikler und Eigelb. — Kältetechnik, 1957, Bd. 9, N 11, s. 342—345.
395. *Riedel L.* Enthalpie — Konzentration — Diagramm für Eiklar. — Kältetechnik, 1957, Bd. 9, N 11 (приложение).
396. *Riedel L.* Enthalpie — Konzentration — Diagramm für Eigelb. — Kältetechnik, 1957, Bd. 9, N 12 (приложение).
397. *Riedel L.* Kalorimetrische untersuchungen über das gefrieren von weissbrot und anderen Nehlprodukten. — Kältetechnik, 1959, Bd. 11, N 2, s. 41—43.
398. *Riedel L.* Enthalpie, Konzentration — Diagramm für Weissbrot. — Kältetechnik, 1959, Bd. 11, N 2 (приложение).
399. *Riedel L.* Zum problem des gebundenen Wasser in Fleisch. — Kältetechnik, 1961, Bd. 13, N 3, s. 122—128.
400. *Riedel L.* Versuche zur Bestimmung der spezischen Wärme des gebundenen Wasser. — Kältetechnik — Klimatisierung, 1966, Bd. 18, N 5, s. 193—195.
401. *Riedel L.* Kalorimetrische untersuchungen an Backhefe. — Kältetechnik, 1968, Bd. 20, N 9, s. 291—293.
402. *Riedel L.* Temperaturleitfähigkeitsmessungen and Wasserreic-

hen Lebensmittel — Kaltetechnik. Klimatisierung, 1969, Bd. 21, N 11, s. 315, 316.

403. Roth D. D., Tsao G. T. Thermal Conductivity of Starch Granules. — Die Stärke, 1970, v. 22, N 2, p. 40—44.

404. Roy N. K., Yadav P. L., Dixit R. N. Density of buffalo Milk Fat. — Milchwissenschaft, 1971, v. 26, N 12, p. 735—737.

405. Rutz W. D., Whitnah C. H., Baetz G. D. Some Physical properties of Milk. — Journal of Dairy Science, 1955, v. 38, N 12, s. 1312—1318.

406. Sandall O. C., King C. J., Wilke C. R. The Relationship between Transport Properties and Rates of Freeze—Drying of Poultry Meat—Chemical Engineering Progress Symposium, 1968, v. 64, N 86, s. 43—53.

407. Saravacos G. D., Pils worth M. N. Thermal Conductivity of Freeze-dried Model Food Gels. — Journal of Food Science, 1965, v. 30, N 5, p. 773—778.

408. Short A. L. The density of processed Milk. — Journal Society Dairy Technology, 1956, v. 9, N 2, p. 81—85.

409. Short A. L. The temperature coefficient of expansion of Raw Milk. — The Journal of Dairy Research, 1955, b. 22, N 1, p. 69—73.

410. Schäfer W. Die spezifische Wärme des Weizens. — Die Mühle, 1955, v. 22, s. 286—287.

411. Schneider F., Schleiphake D., Klimmen A. Dichtetabell für waßrige sacharoselösung. — Zucker, 1963, v. 16, N 10, s. 1—19.

412. Seveik V. J., Sunderland J. E. Emissivity of Beef. — Food Technology, 1963, v. 16, N 9, p. 124—126.

413. Sindhu J. S., Roy N. K. Density of buffalo Milk Fat. — Milchwissenschaft, 1972, v. 27, N 11, p. 699—701.

414. Slavicek E., Handa K., Kminek M. Mereni teplotnivodivosti Repty. — Listy Cukrovarnicke, 1962, v. 78, N 5, s. 116—118.

415. Sörenfors P. Determination of the thermal Conductivity of minced Meat. — Lebensmittel—Wissenschaft—Technologi, 1974, Bd. 7, N 7, s. 236—238.

416. Spells K. E. The thermal Conductivities of Some Biological Fluids. — Physics in medicine and biology, 1960, v. 5, N 2, p. 139—153.

417. Stuart E. B., Closset G. Pore size effect in the freeze drying process. — Journal of Food Science, 1971, v. 36, N 3, p. 388—391.

418. Studies on squid and its processing — Food Science Technology Abstract, 1976, v. 8, N 7, p. 165.

419. Sweat V. E. Experimental values of thermal Conductivity of selected Fruits and Vegetables. — Journal of Food Science, 1974, v. 39, N 6, p. 1080—1084.

420. Sweat V. E., Haugh C. G., Stadelman W. J. Thermal Conductivity of Chicken meat at temperatures between —75° and 20° C. — Journal of Food Science, 1973, v. 38, N 1, p. 158—160.

421. The Heat Content of Bread. Maunheim H. C., Steinberg M. P. Nelson A. J., Kendall T. W. — Food Technology, 1957, v. 11, N 7, p. 384—388.

422. The Freezing Rreservation of Foods. 1968, v. 2, Westport, Connecticut, chapter 2, p. 26—51.

423. Thermal conductivity of dry milk in a packed bed. A. W. Farrall, A. C. Ghen, P. Y. Wang, A. M. Dhanan. — Transactions of the ASAS, 1970, v. 13, N 3, p. 391—394.

424. Thermal conductivity measurements of food products by the

heated thermocouple method. E. Artecke, E. Gogol, W. Gogol, B. Staniszewski. Bull. Inst. Internat. du froid, 1974, v. 54, annexe 3, p. 213—218

425. *Thermal Conductivity values for Ground Beef and Chuck* M. Qashou, G. H. Nix, R. I. Vachon, G. W. Lowery. — Food Technology, v. 24, N 4, 1970, p. 189—192

426. *Thermal Properties of Wet Porous Material Near Freezing Point*. K. Katayama, M. Hattori, K. Kasahara, J. Kimura, M. Okada. — Ashrae Journal, 1973, N 4, p. 56—61.

427. *Tonn H., Molinhuauer J. Zähigkeiten, Oberflächenspannung und weitere Stoffwerte von Würze und Bier*—Monatschrift für Brauerei, 1961, N 7, s. 108—114.

428. *Turrell F. M., Perry R. L. Specific Heat and Heat Conductivity of Citrus Fruit*. — Proc. of the American Society for Horticultural Science, 1957, v. 70, p. 261—265.

429. *Unterberg W. Thermal properties of Salt Solutions*. — British Chemical Engineering, 1966, v. 11, N 6, p. 494, 495.

430. *Uraz T. Untersuchungen über die Milchbildung sowie über die physikalischen und chemischen Konstanten des Milchfettes der ersten Generation einer Kreuzung zwischen Saanen- und Kilis-Ziegen*. — Milchwissenschaft, 1967, v. 22, N 11, s. 697—699.

431. *Vacek V. Merení tepelne vodivosti sublimacne susených potravín*. — Promysl Potravin, 1977, v. 28, N 11, s. 626, 170—630, 174.

432. *Varshney N. N., Oyha T. P. The effect of Temperature on the specific heat of dried Milk baby foods*. — Austral. Journal of Dairy Technology, 1974, v. 29, N 4, p. 193—197.

433. *Wagenbreth H. Dichte und Oberflächenspannung von Athanal — Wasser — Wischungen für die Internationalen Alkoholtafeln der OIML*. — PTB—Mitt, 1972, v. 82, N 5, s. 299—303.

434. *Wadsworth J. I., Spadaro J. J. Transient Temperature Distribution in Whole Sweetpotato Roots During Immersion Heating*. — Food Technology, 1969, v. 23, N 2, p. 219—223.

435. *Waldt L. M., Kehoe D. Starch Chemistry for the Food Technologist*. — Food Technology, 1959, v. 13, N 1, p. 1—4.

436. *Walters R. E., May K. N. Thermal Conductivity and Density of Chicken Breast Muscle and Skin*—Food Technology, 1963, v. 17, N 6, p. 130—133.

437. *Varshney N. N., Oyha T. P. Thermal conductivity of dried Milk baby foods*. — Austral. Journal Dairy Technology, 1974, v. 29, N 2, p. 79—84.

438. *Vasic J. de Man J. M. Effect of Temperature history on the Solid fat content of Milk Fat*. — Journal of Dairy Science, 1965, N 10, p. 1277—1281.

439. *Watson P. D., Tittsler R. P. The Density of Milk at low temperatures*. — Journal of Dairy Science, 1961, v. 44, N 3, p. 416—424.

440. *Watson P. D., Tittsler R. P. The Density of Cream at low temperatures*. — Journal of Dairy Science, 1962, v. 45, N 2, p. 159—163.

441. *Wheelock T. D., Lancaster E. B. Thermal properties of wheat Flour*. Die Stärke, 1970, v. 22, N 2, s. 44—48.

442. *Whitehead R. C. Fat analysis of Boned Meat by the Specific Gravity method*. — Food Technology, 1970, v. 24, N 4, p. 469—473.

443. *Whitnah C. H., Medved T. M., Rutz W. D. Maximum Density of Milk*. — Journal of Dairy science, 1957, v. 40, N 7, p. 856—861.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6

РАЗДЕЛ I

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. Теплофизические и структурные свойства пищевых продуктов	14
Теплофизические свойства пищевых продуктов	14
Некоторые структурные свойства пищевых продуктов	19
Основные формы связи влаги с материалом	19
Влияние агрегатного состояния и структуры пищевых продуктов на их теплофизические характеристики	22
Влияние фазовых переходов на теплофизические характеристики пищевых продуктов	32
2. Методы определения теплофизических характеристик и влажности пищевых продуктов	37
Методы определения коэффициента теплопроводности	38
Методы определения теплоемкости	51
Методы определения коэффициента температуропроводности	55
Импульсные методы определения теплофизических характеристик с помощью линейного или плоского источника тепла	60
Сравнительные методы, основанные на применении неограниченного эталона	63
Методы определения влажности пищевых продуктов	73

РАЗДЕЛ II

ЗНАЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ АНАЛИЗ

1. Овощи, плоды, ягоды и продукты из них	79
Свежие и термически обработанные овощи, плоды и ягоды	79

Продукты из овощей, плодов и ягод	101
2. Мясо и мясные продукты	106
Мясо убойного скота, сельскохозяйственной (домашней) птицы и дичи	106
Мясные продукты	120
3. Рыба и рыбные продукты	129
Свежая и термически обработанная рыба	129
Продукты переработки рыбы	140
Нерыбные пищевые продукты моря	145
4. Молоко и молочные продукты	147
Молоко	147
Молочные продукты	154
5. Яйца и яичные продукты	175
6. Пищевые жиры	179
Животные жиры	179
Растительные масла	182
Маргарин и кулинарные жиры	186
7. Продукты переработки зерна, хлебные и мучные кондитерские изделия	189
Мука	189
Тесто для хлебных изделий. Тесто-хлеб	192
Мякиш и корка хлеба	199
Сухари	200
Тесто для мучных кондитерских изделий. Тесто — выпеченные мучные кондитерские изделия	203
Макаронны	208
Крупа. Каши	208
8. Сахар и сахарные растворы	217
Сахар	217
Сахарные растворы	223
9. Крахмал. Сахаристые продукты. Дрожжи	227
Крахмал	227
Патока	231
Мед	233
Глюкоза	234
Инвертиный сироп	235
Дрожжи	236
10. Сырье и полуфабрикаты шоколадного производства. Шоколад	238
Сырье и полуфабрикаты шоколадного производства	238
Шоколад	240
11. Вкусовые продукты	240
Кофе	240
Чай	243
Пищевые кислоты	244
Поваренная соль	246
12. Напитки и материалы для их приготовления	248
Алкольные напитки	248
Слабоалкогольные напитки	255
13. Упаковочные материалы	258
Список использованной литературы	260
К введению	260
К разделу I	261
К разделу II	263

