

УДК 664.8/9

Рациональная точность определения теплофизических характеристик пищевых продуктов в расчетах технологических параметров холодильной обработки*Канд. техн. наук* **В.И. Филиппов**, valery98rus@mail.ru**А.В. Степанов***Университет ИТМО**191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Технические средства холодильной обработки не создаются для пищевых продуктов со строго определенными свойствами, поскольку различие величин теплофизических характеристик (удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности) даже для продуктов одного товарного наименования достигают 20–30% и более. Это является следствием биологической неоднородности их химического состава и строения. Анализ результатов расчета продолжительности процесса и отводимого тепла при охлаждении и замораживании пищевых продуктов показывает, что стремление к чрезмерно точному экспериментальному определению теплофизических характеристик утрачивает смысл. Погрешность их определения, равная 5–8%, вполне приемлема и обеспечивает практическую достоверность теплофизических расчетов процессов холодильной технологии пищевых продуктов.

Ключевые слова: пищевые продукты; удельная теплоемкость; коэффициент теплопроводности; коэффициент температуропроводности; охлаждение; замораживание.

Rational determination accuracy of the foodstuff thermal and physical characteristics in the calculation of cold treatment*Ph.D.* **V.I. Filippov**, valery98rus@mail.ru**A.V. Stepanov***ITMO University**191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

Technical equipment of refrigerated processing are not created for foodstuffs with strictly determined properties because the difference of thermal and physical characteristics (specific heat, heat conductance coefficient, heat diffusivity coefficient) of equal foodstuffs approach 20–30% and more over. It's a result of biological inhomogeneity of the composition and structure. The analytical calculation result of the time process and removed heat in refrigerating and freezing of the foodstuffs demonstrates that the accurate experimental determination of the thermal and physic characteristics is inexpedient. The error is equal to 5–8% is quite acceptable and provides practical accuracy of the thermal and physic processes calculations in the foodstuff refrigeration technology.

Keywords: foodstuffs; specific heat; heat conductance coefficient; heat diffusivity coefficient; refrigerating; freezing.

Потребительский рынок постоянно пополняется новыми видами и наименованиями консервированной пищевой продукции. Разработка технологий консервирования такой продукции, как правило, связана с выполнением теплофизических расчетов процессов тепловой (варка, обжарка, сушка, пастеризация, стерилизация) и холодильной (охлаждение, подмораживание, замораживание, отепление, размораживание) обработки продуктов питания [1–8]. Достоверность результатов таких расчетов тесно связана с теплофизическими характеристиками (ТФХ) пищевых продуктов растительного и животного происхождения [10, 11]. Основными ТФХ пищевых продуктов являются

удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности. К теплофизическим характеристикам относят также температуру начала замерзания пищевых продуктов, теплоты дыхания пищевого сырья растительного происхождения и теплоты затвердевания жиров. Последние два показателя ТФХ в практике теплофизических расчетов процессов пищевых технологий не используются.

Известно, что величины ТФХ неодинаковы даже для одного вида и товарного наименования пищевого продукта [9–11]. Поэтому важно представить какие пределы точности знания ТФХ продуктов, а также уровень сложности методов их экспериментального определения, могут быть признаны рациональными для выполнения технических расчетов процессов холодильного консервирования. Эта задача рассматривается в излагаемых далее соображениях. В большинстве случаев выбор методов и достоверность результатов экспериментального определения ТФХ исследуемых пищевых продуктов и материалов проводится без учета неоднородности их состава и строения [12–17].

Для решения поставленной задачи были использованы опытные данные ТФХ некоторых наименований животных и растительных пищевых продуктов, взятые из справочной литературы [18, 19].

Различия в свойствах пищевых продуктов, которые далее будут называться неоднородностью, определяются соответствующими различиями их химического состава и строения. Эти различия являются следствием биологической природы происхождения пищевой продукции. По данным различных авторов, указанных в таблице 1, содержание влаги, например, в говядине колеблется от 62 до 78%, в свинине – от 35 до 77%. Помимо этого ТФХ зависят от термического состояния пищевого продукта. В значительной степени процесс льдообразования при замораживании пищевых продуктов вносит неповторимую картину структурных преобразований в них.

Расчетные данные удельной теплоемкости различных продуктов при температуре 0°C и –20°C, вычисленные в соответствии с законом аддитивности по данным теплоемкости сухих веществ продуктов животного происхождения равным 1,672 кДж/(кг*К) и продуктов растительного происхождения – 0,898 кДж/(кг*К), предоставлены в графах 6 и 7 таблицы 1. Экспериментальные данные, полученные различными авторами для этих продуктов, представлены в графах 4 и 5 таблицы 1. Приведенные данные показывают, что различие опытных величин теплоемкости мяса говядины при температуре выше криоскопической достигает 8,8%. Различие расчетных величин теплоемкости этого продукта при той же температуре составляет 20,5%. Для свинины такие различия соответственно составляют 47 и 28%.

Опытные и расчетные величины теплоемкости замороженной говядины и свинины в пределах продукта одного товарного наименования различаются на 21–24%. Подобное различие данных теплоемкости для продуктов растительного происхождения при температуре выше криоскопической не превышает 6,5% и замороженных 10,5% (таблица 1). Следует отметить, что в величины теплоемкости замороженных продуктов, полученных экспериментально, в качестве составляющей естественным образом входит теплота фазового превращения воды в лед. Для объективности сопоставления опытных и расчетных данных теплоемкости это учтено при определении расчетных величин теплоемкости продуктов, представленных в таблице 1.

Величины теплоемкости наиболее часто используются для расчета количества теплоты, отводимой от продуктов при охлаждении и замораживании. Результаты расчета количества отводимой теплоты при замораживании различных животных и растительных продуктов, полученные по опытным и расчетным данным теплоемкости этих продуктов, представлены соответственно в графах 8 и 9 таблицы 1.

Таблица 1

Удельная теплоемкость пищевых продуктов

№ пп	Наименование продукта	Содержание влаги, %	Теплоемкость (опытные данные), кДж/(кг*К)		Теплоемкость (расчетные данные), кДж/(кг*К)		Количество отведенного тепла, кДж/кг	
			температура, °С		температура, °С		по опыту	по расчету
			0	-20	0	-20		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Говядина	74,5	3,47	2,51	3,51	2,88	331	336
2	Говядина выше средней упитанности	74,5	3,80	3,30	3,51	2,88	349	336
3	Говядина ниже средней упитанности	78,5	3,80	3,30	3,64	2,97	359	351
4	Говядина свежая	62,0	2,93	-	2,88	2,34	-	292
5	Говядина свежая	67,0	3,51	-	3,01	2,42	-	294
6	Свинина	76,8	3,80	3,30	3,55	2,88	356	343
7	Свинина свежая	35,0	2,01	-	2,55	2,13	-	200
8	Свинина свежая	42,0	2,26	-	2,72	2,38	-	227
9	Треска	80,3	3,68	2,59	3,68	2,97	351	358
10	Пикша	83,6	3,72	2,55	3,76	3,01	359	369
11	Окунь	79,1	3,59	2,51	3,64	2,97	344	354
12	Морковь	90,0	3,80	2,51	3,85	2,76	385	390
13	Морковь	83,1	3,93	2,80	3,59	2,59	372	361
14	Капуста цветная	90,7	3,97	2,42	3,85	2,93	401	408
15	Капуста цветная	92,0	3,89	2,63	3,89	3,01	407	414

Результаты расчета тепловой нагрузки на охлаждающие приборы камеры холодильной обработки пищевых продуктов по приведенным в таблице 1 расчетным и опытным данным теплоемкости показывают, что вследствие неоднородности состава мяса различие количества отведенной теплоты при его замораживании может достигать для говядины 16,8%, свинины 41%. Различие величин по этому показателю для рыбы, моркови и капусты не превышает 7,5% (таблица 1 графы 8 и 9). Таким образом, ввиду неоднородности состава пищевых продуктов различие вычисленного количества тепла, отведенного при их замораживании, может достигать 41%, и объективно эта цифра не может быть уменьшена. Учитывая это обстоятельство, стремление к максимально точному определению удельной теплоемкости пищевых продуктов даже одного наименования и различного термического состояния утрачивает смысл.

Расчетных способов определения коэффициентов теплопроводности пищевых продуктов при температурах выше криоскопической не существует, но есть способы вычисления теплопроводности

продуктов по мере развития льдообразования в них [9, 10]. Рассмотрим влияние неоднородности состава и структуры пищевых продуктов на величины коэффициента теплопроводности и как следствие на результаты расчетов технологических параметров их холодильной обработки. Для оценки величин теплопроводности и проведения теплофизических расчетов взяты опытные данные некоторых пищевых продуктов животного происхождения при положительных и отрицательных температурах (таблица 2 графы 4 и 5).

Таблица 2

Коэффициент теплопроводности пищевых продуктов

№ пп	Наименование продукта	Содержание влаги, %	Теплопроводность (опытные данные), Вт/(м*К)			Продолжительность замораживания, ч
			температура, °С			
			0	-20	-6,35	
1	2	3	4	5	6	7
1	Говядина выше средней упитанности	74,5	0,48	1,43	1,13	2,35
2	Говядина ниже средней упитанности	78,5	0,48	1,57	1,00	2,8
3	Говядина тощая, 3,4% жира (поперек волокон)	74	0,48	1,16	1,04	2,54
4	Говядина тощая из поясничной части, 0,9 % жира (вдоль волокон)	75	0,49	1,57	1,30	2,05
5	Свинина	76,8	0,49	1,29	0,81	3,35
6	Свинина тощая из окорока, 6,1% жира (вдоль волокон)	72	0,48	1,55	1,33	1,9
7	То же (поперек волокон)	72	0,50	1,34	1,20	2,14
8	Грудная часть индейки, 2,1% жира (вдоль волокон)	74	0,50	1,60	1,38	1,9
9	То же (поперек волокон)	74	0,50	1,26	1,14	2,31
10	Бедренная часть индейки, 3,4 % жира (поперек волокон)	74	0,50	1,59	1,23	2,13

Различие величин теплопроводности мяса говядины при температуре 0 °С составляет всего 2,3%, а при -20°С оно достигает 26%. Соответственно для свинины эти различия равны 4,6 и 17%, мяса индейки 0 и 18%, различных видов рыбы 23 и 34%.

Влияние различий теплопроводности указанных продуктов на технологические параметры процессов их холодильной обработки оценивались по величинам продолжительности замораживания, вычисленным по формуле Планка [9]. Расчет продолжительности замораживания проводился на примере тела в форме плоской пластины толщиной 0,05 м при коэффициенте теплоотдачи от поверхности тела к охлаждающей среде равном бесконечности. Величина последнего принята

из соображений максимального изменения продолжительности замораживания при минимальном изменении теплоемкости и теплопроводности продукта. Конечные среднеобъемные температуры замороженных продуктов приняты равными -20°C , величины коэффициентов теплопроводности продуктов вычислены для средней температуры процесса замораживания равной $-6,35^{\circ}\text{C}$ (таблица 2 графа 6).

В рассматриваемом случае важны не абсолютные значения продолжительности замораживания, а диапазон ее изменений, являющихся следствием неоднородности и различия величин теплопроводности одного и того же наименования продукта. Расчет показал, что даже для одноименного продукта при прочих равных условиях различие продолжительности замораживания составляет 17–44% и в основном это явилось результатом различия величин теплопроводности (таблица 2 графа 7).

В этом случае также стремление достигнуть большей достоверности вычисления технологических параметров холодильной обработки за счет использования величины теплопроводности, полученной с большей точностью для одиночного образца продукта, не представляет общей ценности для технических расчетов холодильной технологии пищевых продуктов.

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов используется в расчетах холодильной технологии реже, чем удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

Обычно коэффициент температуропроводности нужен при использовании каких-либо критериальных зависимостей, служащих для вычисления продолжительности процессов охлаждения или замораживания продуктов. Ограничимся использованием этого коэффициента в расчетной формуле продолжительности замораживания, полученной А. Лондоном и Р. Себаном, по существу тождественной расчетной формуле, полученной Р. Планком [9].

Расчет продолжительности замораживания продуктов проводился по опытным данным коэффициентов температуропроводности, полученным для средней температуры процесса замораживания (таблица 3 графа 5) и коэффициенте теплоотдачи равном бесконечности. Остальные данные для расчета приняты аналогичные расчету продолжительности замораживания по формуле Планка. Из приведенных таблице 3 данных следует, что различие величин температуропроводности для мяса говядины составляет 59%, для судака 37%.

Вследствие неоднородности состава и строения пищевых продуктов расчетное время замораживания одного и того же вида продукта, полученное с использованием данных температуропроводности, отличалось на 37–55% (таблица 3 графа 7).

Как и в предыдущих случаях увеличение достоверности результатов расчета технологических параметров холодильной обработки путем поиска наиболее точной величины ТФХ, в данном примере коэффициента температуропроводности, даже для пищевых продуктов одного товарного наименования недостижимо, вследствие неоднородности их состава и строения.

Таблица 3

Коэффициент температуропроводности пищевых продуктов

№ пп	Наименование продукта	Содержание влаги, %	Температуропроводность (опытные данные), $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^8$		Время замораживания, ч.
			температура, °С		
			-20	-6,3	
1	2	3	4	5	7
1	Говядина выше средней упитанности	74,5	43,0	21,4	0,76
2	Говядина ниже средней упитанности	78,5	47,2	22,8	0,71
3	Говядина	–	–	9,4	1,7
4	Судак (данные Лобзина)	–	–	11,1	1,45
5	Судак (данные Чижова)	–	–	17,5	0,92
6	Свинина	76,8	38,9	16,9	0,95

Приведенный анализ влияния неоднородности пищевых продуктов, связанной с биологической природой их происхождения, на результаты расчетов теплофизических процессов холодильной технологии позволяет сделать следующие выводы.

1. Результаты частных определений любой из теплофизических характеристик пищевых продуктов, полученных с большей точностью, представляют меньшую ценность для технических расчетов холодильной технологии, нежели статистически осредненные результаты многих определений подобных характеристик продукта одного товарного наименования, выполненные с ограниченной точностью или найденные расчетным путем, если это возможно.

2. Рациональная достоверность экспериментальных или расчетных величин теплофизической характеристики определяется полным диапазоном ее значений для продукта какого-либо наименования, поскольку расчетные параметры технологических процессов холодильного консервирования, такие как отведенное тепло или время охлаждения и замораживания продуктов при холодильной обработке, практически пропорциональны величинам теплофизических характеристик, принятых в расчетах.

3. Погрешность определения теплофизических характеристик пищевых продуктов равная 5–8% вполне обеспечит практическую достоверность расчета технологических параметров холодильной обработки пищевой продукции. Это важно в условиях постоянного пополнения потребительского рынка новыми видами товаров пищевого назначения, что требует получения оперативной с наименьшими затратами материальных и трудовых ресурсов информации по теплофизическим характеристикам такого вида продукции.

Литература

1. Васильев В.Н., Куцакова В.Е., Фролов С.В. Технология сушки. Основы тепло- и массообмена: учебник. СПб.: ГИОРД, 2013. 222 с.
2. Филиппов В.И., Кременевская М.И., Куцакова В.Е. Технологические основы холодильной технологии пищевых продуктов: учебник для вузов. СПб.: ГИОРД, 2014. 576 с.

3. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. М.: Колос-Пресс, 2001. 144 с.
4. Филиппов В.И., Эглит А.А., Шилкин А.С. Особенности замораживания нежных ягод // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. №1.
5. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кременевская М.И., Гадоев М.Н. Усушка при замораживании // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 7. С. 51-52.
6. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Мухина О.А., Горяинов С.Н. Интенсификация размораживания мяса гидроаэрозольным способом // Мясная индустрия. 2003. № 10. С. 29-32.
7. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кременевская М.И., Филиппов В.И., Нечай Р.С. Моделирование процесса размораживания плодов и ягод в жидких средах // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 1. С. 88-90.
8. Куцакова В.Е., Кременевская М.И., Филиппов В.И., Нечай Р.С. Диффузионная модель образования конгломератов замороженных ягод при холодильном хранении // Хранение и переработка сельхозсырья. № 11. 2008. С. 22-23.
9. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Филиппов В.И., Данин В.Б. Холодильная технология пищевых продуктов: учебник для вузов: в 3 кн. Часть 1. Технологические основы. СПб.: ГИОРД, 2007. 224 с.
10. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. СПб.: ГИОРД, 2012. 269 с.
11. Куцакова В.Е., Рогов И.А., Фролов С.В., Филиппов В.И. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Теоретические основы консервирования: учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2008. 287 с.
12. Короткий И.А., Короткая Е.В. Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов и материалов // Известия вузов. Пищевая технология. 2008. № 2-3. С. 109-111.
13. Исаков Р.М. Исследование теплофизических характеристик сырья мясокостной муки // Пищевая технология и сервис. 2004. № 1. С. 56-57.
14. Исаков Р.М. Экспериментальное определение теплофизических характеристик отходного птичьего сырья и птичьей мясокостной муки // Молодой ученый. 2012. № 4. С. 22-24.
15. Пономарев С.В., Балабанов П.В., Трофимов А.В. Оценка погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов // Измерительная техника. 2004. № 1. С. 44-47.
16. Балабанов П.В., Пономарев С.В. Повышение точности метода двух альф при измерении теплофизических характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 57-60.
17. Баранов И.В., Никитин А.А. Комплексное измерение теплофизических свойств в условиях монотонного разогрева // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 1. С. 62-63.
18. Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и материалов. М.: Книга по требованию, 2012. 185 с.
19. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.

References

1. Vasilev V.N., Kutsakova V.E., Frolov S.V. *Drying technology. The bases of heat and mass exchange*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2013, 222 p.
2. Philippov V.I., Kremenevskaya M.I., Kutsakova V.E. *Technological bases of refrigeration food technology*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2014. 576 p.
3. Frolov S.V., Kutsakova V.E., Kipnis L.V. *Heat and mass exchange in calculation processes of refrigeration food technology*. Moscow, KOLOS-PRESS, 2001. 144 p.
4. Philippov V.I., Aglit A.A., Shilkin A.S. The qualities of sweet berries freezing. *Processed and equipment of food production*. 2013, no. 1.
5. Frolov S.V., Kutsakova V.E., M.I. Kremenevskaya, Gadoev M.N. Drying at freezing. *International scientific magazine*. 2013, no. 7, pp. 51-52.
6. Frolov S.V., Kutsakova V.E., Muhina O.A., Goryanov N.V. Intensification of meat defrosting by water and air way. *Meat industry*. 2003, no. 10, pp. 29-32.

7. Frolov S.V., Philippov V.I., Kremenevskaya M.I., Kutsakova V.E., Nechai R.S. Modeling processes of fruits and berries defrosting at fluid. *Food technology*. 2009, no. 1, pp. 88-90.
8. Philippov V.I., Kremenevskaya M.I., Kutsakova V.E., Nechai R.S. Diffusion model of conglomerate formation berries freezing at cold storage. *Storage and processing of agricultural products*. 2008, no. 11, pp. 22-23.
9. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Philippov V.I., Danin V.B. *Refrigeration food technology*. St. Petersburg, GIORD Publ., 2007, 224 p.
10. Baranenko A.V., Kutsakova V.E., Borzenko E.I., Frolov S.V. The examples and tasks of refrigeration food technology. Technological bases of preservation. St. Petersburg, GIORD Publ., 2008, 287 p.
11. Philippov V.I., Kremenevskaya M.I., Kutsakova V.E. *Technological bases of refrigeration food technology*. St. Petersburg, GIORD Publ., 2014, 574 p.
12. Baranenko A.V., Kutsakova V.E., Borzenko E.I., Frolov S.V. The examples and tasks of refrigeration food technology. St. Petersburg, GIORD Publ., 2012, 269 p.
13. Isakov R.M. Analysis of thermophysical characteristics of meat and bone meal. *Scientific magazine «Foodtechnologyansservice»*. 2004, no. 1, pp. 56-57.
14. Isakov R.M. The experimental determination of thermophysical characteristics of bird raw materials and bird's meat and bones meal. 2012, no. 4, pp. 22-24.
15. Ponomarev S.V., Balabanov P.V., Trofimov A.V. *Measurement fault assessment of solid's thermophysical characteristics*. 2004, no. 1, pp. 44-47.
16. Ponomarev S.V., Balabanov P.V. Increasing of accuracy 2 alpha methods at measurement of thermophysical characteristics. 2011, no. 2, pp. 57-60.
17. Baranov I.V., Nikitin A.A. Full measurement of thermophysical characteristics at monotonic warming. *News SPBGUNiPT*. 2006, no.1, pp. 62-63
18. Chubik I.A., Maslov A.M. Catalog of food thermophysical characteristics. M.: Knigapotrebovaniu, 2012. 185 p.
19. Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovska G.I. *Thermophysical characteristics of food products*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 287 p.