

Исследование теплоизоляционных свойств термочехлов для укрытия паллет с пищевой продукцией при заданных температурных режимах

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

ВНИИХ — филиал ФГБНУ
«ФНЦ пищевых систем
им. В.М. Горбатова» РАН, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Непрерывность холодильной цепи при транспортировании и хранении скоропортящихся пищевых продуктов в большой степени зависит от эффективности вспомогательных средств термозащиты, включая термочехлы для укрытия паллет. Недостаточная теплоизоляция может привести к нарушению температурного режима, ускоренной порче продукции и экономическим потерям.

Цель: Оценить и сравнить теплоизоляционные свойства коммерческих образцов трехслойных термочехлов, предназначенных для укрытия паллет с пищевой продукцией, при имитации типичных условий погрузочно-разгрузочных операций.

Материалы и методы: Исследования проведены в теплоизолированной камере. В качестве модельного груза использовали реальные продукты (салат «Оливье») и имитаторы с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Плотность теплового потока измеряли с помощью измерителя ИТП-МГ4.03 «Поток», коэффициент теплопередачи (k) рассчитывали по стандартной методике. Температуру продукта регистрировали в течение 12 ч.

Результаты: Установлена прямая корреляция между коэффициентом теплопередачи термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры скоропортящейся продукции (7,0 °C). Наилучшие изоляционные свойства продемонстрировал термочехол с $k = 0,63 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, обеспечивший сохранение безопасной температуры продукции в течение 58 мин. Худшие характеристики показал термочехол с $k = 1,09 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, под которым температура продукции достигла 7,0 °C уже через 28 мин.

Заключение: Коэффициент теплопередачи является надежным индикатором эффективности термочехлов при кратковременных нарушениях холодильной цепи. Полученные данные позволяют оценить термозащитные материалы и обоснованно выбрать решения, способствующие снижению потерь и повышению устойчивости холодильной цепи.

Ключевые слова: холодильная цепь; хранение; температурные режимы; термочехлы; теплофизические свойства; пищевые продукты

Корреспонденция:

Владимир Владиславович
Никитин

E-mail: vnikh@fncps.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 02.10.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Финансирование:

Статья подготовлена в рамках
выполнения НИР по теме
№ FGUS 2025 0004
государственного задания
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем
им. В.М. Горбатова» РАН

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Никитин, В.В., Сучков, А.Н., Савицкий, Р.Б., & Онацкий, И.Т. (2025). Исследование теплоизоляционных свойств термочехлов для укрытия паллет с пищевой продукцией при заданных температурных режимах. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 14-31. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.95>

Study of the Thermal Insulation Properties of Thermal Covers for Pallets with Food Products under Specified Temperature Conditions

Vladimir V. Nikitin, Alexander N. Suchkov, Roman B. Savitskiy, Ilya T. Onatskiy

All-Russian Scientific Research
Institute of Refrigeration
Industry — Branch
of V. M. Gorbатов Federal Research
Center for Food Systems of RAS,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The continuity of the cold chain during transportation and storage of perishable food products largely depends on the effectiveness of auxiliary thermal protection means, including thermal covers for pallets. Inadequate thermal insulation can lead to temperature deviations, accelerated product spoilage, and economic losses.

Purpose: To evaluate and compare the thermal insulation properties of commercial samples of three-layer thermal covers designed for pallets with food products, under simulated typical loading and unloading conditions.

Materials and Methods: The studies were carried out in a thermally insulated chamber. Real food products (Olivier salad) and simulators with equivalent thermophysical properties were used as model cargo. Heat flux density was measured using the ITP-MG4.03 «Potok» heat flux meter, and the heat transfer coefficient was calculated according to a standard methodology. Product temperature was recorded continuously over a period of 12 hours.

Results: A direct correlation was established between the heat transfer coefficient (k) of thermal covers and the time required for perishable food products to reach the critical temperature of 7,0°C. The best thermal insulation performance was demonstrated by the cover with $k = 0,63 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$, which maintained a safe product temperature for 58 minutes. The poorest performance was observed for the cover with $k = 1,09 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$, under which the product temperature reached 7,0 °C in just 28 minutes.

Conclusion: The heat transfer coefficient is a reliable indicator of thermal cover effectiveness during short-term cold chain disruptions. The obtained data enable objective evaluation of thermal protection materials and support informed selection of solutions aimed at reducing losses and enhancing cold chain resilience.

Keywords: cold chain; storage; temperature regimes; thermal covers; thermophysical properties; food products

Correspondence:

Vladimir V. Nikitin

E-mail: v.nikitin@fncps.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 02.10.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Funding:

The article was prepared within the framework of the research project No. FGUS-2025-0004 under the State Assignment of the Federal Research Center of Food Systems named after V.M. Gorbатов, Russian Academy of Sciences (FRC FS RAS)

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Nikitin, V.V., Suchkov, A.N., Savitskiy, R.B., & Onatskiy, I.T. (2025). Study of the thermal insulation properties of thermal covers for pallets with food products under specified temperature conditions. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 14-31. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.95>

ВВЕДЕНИЕ

В экономически развитых странах затраты на сохранение произведенной пищевой продукции в значительной степени компенсируются за счет снижения потерь на этапах хранения, транспортирования и реализации конечному потребителю (Rodriguez, 2016; Тяпухин, 2021). Ключевым фактором достижения данного эффекта стало формирование непрерывной холодильной цепи, развитие которой началось в 1980-е годы и сопровождалось внедрением нормативных документов и специализированных технических средств (Тертеров, 1981). В СССР ее формирование происходило значительно медленнее вследствие дефицита холодильного оборудования, ограниченных возможностей управления и отсутствия эффективных механизмов прослеживаемости. Указанные ограничения во многом сохраняют актуальность и в настоящее время, что обуславливает значительные объемы продовольственных потерь в России (Kornienko, 2020).

Непрерывная холодильная цепь рассматривается как системообразующий элемент минимизации потерь, сохранения качества и обеспечения безопасности скоропортящихся пищевых продуктов на всем протяжении их движения от производителя до потребителя (Hoang, 2011; Андреев, 2016; Han, 2021; Tan, 2025). Контроль параметров окружающей среды является критически важным, поскольку большинство скоропортящихся продуктов характеризуется высокой термочувствительностью и быстрым ухудшением потребительских свойств при отклонении от регламентированных температурных режимов (Ren, 2022; Zhang, 2017).

Вместе с тем многоуровневая структура холодильной цепи (Yan, 2021; Lu, 2022) и ее высокая зависимость от технической и инфраструктурной оснащенности (Zheng, 2022) определяют ее уязвимость к широкому спектру рисков. К числу основных факторов риска относятся человеческий фактор (Wang, 2024), недостатки упаковки (Ali, 2018; Wang, 2022), климатические воздействия, технические неисправности и управленческие ошибки (Li, 2022), что в совокупности формирует высокую степень сложности и нестабильности функционирования холодильной цепи (Latha, 2023).

Дополнительную угрозу представляют преднамеренные отключения холодильного оборудования, приводящие к локальным разрывам холодильной цепи (Bai, 2023). Нарушения температурных режимов на этапах

транспортирования и хранения существенно увеличивают масштабы потерь продукции (Ndraha, 2018; Onwude, 2023), снижая рентабельность производителей и увеличивая издержки для конечных потребителей (Yang, 2017).

Риски нормативного и регуляторного характера усиливаются многоуровневостью и фрагментарностью требований, что обуславливает необходимость внедрения прозрачных механизмов контроля и координированных управленческих решений. Согласованная государственная политика в данной области способствует соблюдению международных и экологических стандартов, а также повышает устойчивость и операционную эффективность холодильной цепи (Dai, 2020; Bal, 2021; Zhang, 2022).

Несмотря на значительный массив исследований, посвященных отдельным элементам холодильной цепи, системный анализ всей цепи поставок охлажденной и замороженной продукции остается недостаточно разработанным (Большаков, 1998; Ворон, 2014; Настасиевич, 2017; Корниенко, 2021). Одной из ключевых методологических проблем является сложность количественной оценки потерь на каждом конкретном участке цепи (Gustavsson, 2011; Parfitt, 2010; Stuart, 2009).

Даже при строгом соблюдении регламентированных температурных режимов на этапах производства и складского хранения качество продукции может существенно изменяться на последующих этапах логистической цепи (Тяпухин, 2018; 2020). При этом действующие нормативные документы, как правило, рассматривают технологический цикл завершенным на складе производителя, не учитывая изменения, возникающие в процессе транспортирования, распределительного хранения и реализации. Между тем именно данные этапы оказывают значительное влияние на конечное качество и безопасность продуктов, поступающих к потребителю (Белозеров, 2007).

В этой связи технологическая документация должна содержать научно обоснованные требования к температурно-влажностным режимам, срокам годности и другим параметрам качества на каждом этапе холодильной цепи (Белозеров, 2012). Техническая инфраструктура холодильной цепи включает производственные и распределительные холодильники, охлаждаемые транспортные средства, торговое холодильное оборудование и холодильные комплексы общественного питания, обеспечивающие непрерывность температурного контроля от момента выхода продукции из произ-

водства до ее реализации (Белозеров, 2007; Белозеров, 2012; Бараненко, 2010; Корниенко, 2021).

На динамику изменения качества продукции влияет не только абсолютное значение температуры, но и ее стабильность во времени. Значительные и длительные колебания температуры сопровождаются ростом внутренней температуры продукта и ускорением процессов, приводящих к их порче (Никитин, 2025). Существенное значение также имеют равномерность температурно-влажностного режима и интенсивность воздухообмена.

Повышение устойчивости продукции к температурным колебаниям возможно не только за счет понижения температур хранения, но и посредством применения дополнительных технологических решений, ограничивающих тепловое взаимодействие продукции с окружающей средой (Румянцева, 2009). В частности, установлено, что применение термостатирующих упаковок позволяет существенно снизить амплитуду температурных колебаний на поверхности продукта. Использование многослойной пузырчатой пленки с высоким сопротивлением теплопередаче уменьшает амплитуду температурных колебаний примерно в два раза, однако такие решения имеют ограниченную эффективность при внутригородских перевозках охлажденной мясной продукции (Корниенко, 2018).

Нарушения температурного режима наиболее часто возникают при загрузке, разгрузке, транспортировании, складировании и подготовке продукции к реализации (Nychas, 2008; Raab, 2011; Zhao, 2022; Lei, 2023). Многократные логистические операции создают условия для кратковременных, но систематических отклонений от регламентированных условий хранения, что в совокупности приводит к ускоренной порче продукции (Шачек, 2023).

Применение теплоизолирующих термочехлов позволяет компенсировать температурные колебания воздуха в кузове рефрижератора при открытии дверей и стабилизировать температуру продукта на уровне начальной загрузки. Однако, несмотря на рост практического использования термочехлов, в научной литературе отсутствуют систематизированные данные о теплофизических характеристиках коммерческих образцов и их влиянии на продолжительность поддержания безопасной температуры продукции при нарушениях холодильной цепи (Корниенко, 2018). Данный пробел затрудняет обоснованный выбор термочехлов и их интеграцию в регламенты холодильной цепи.

В настоящем исследовании выдвинута гипотеза о наличии зависимости между базовыми теплофизическими характеристиками термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры продукции. Целью работы являлось экспериментальное определение и сравнительный анализ теплофизических характеристик различных типов термочехлов с установлением их влияния на продолжительность сохранения безопасного температурного режима охлажденной скоропортящейся пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений холодильной цепи. Исследование выполнено методом температурного мониторинга в теплоизолированной камере.

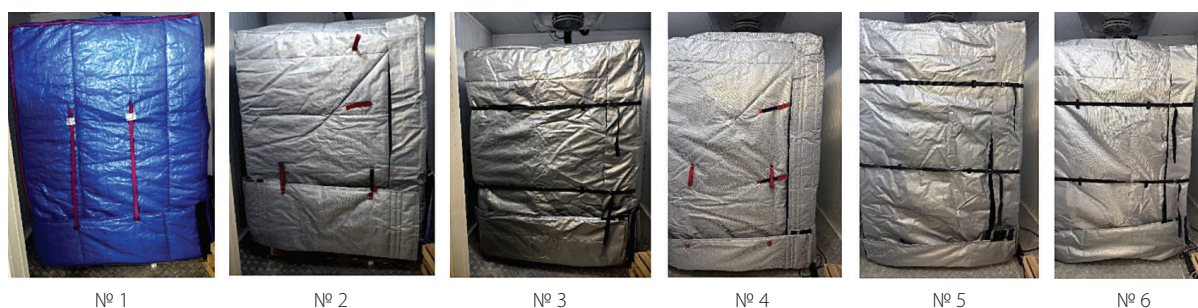
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования являлись шесть образцов трехслойных термочехлов, предназначенных для укрытия паллет с пищевой продукцией (Рисунок 1). Образцы

Рисунок 1
Объекты исследования

Figure 1
Objects of Research



В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

изготовлены различными производителями в соответствии с техническими требованиями (Таблица 1).

Таблица 1

Основные технические требования к термочехлам

Table 1

Main Technical Requirements for Thermal Covers

Геометрические размеры		
Параметр	Числовое значение	
Внутренний размер, мм	1220×822×2100	
Толщина, мм	25–30	
Конструкция и состав		
Корпус состоит из 5 граней, 4 боковых и 1 верхней		
Слой	Предназначение	Материал
Внешнепокрывной, внутренний	Защита внутренних слоев термочехла от механических повреждений и влаги	В соответствии с нормативными документами*; рекомендуемая поверхностная плотность материала — не менее 180 г/м²; диапазон рабочих температур от минус 30,0 до 30,0 °С, при этом материал не должен деформироваться, расслаиваться и изменять свои физические свойства
Теплоизолирующий	Сохранение температуры продукции	В соответствии с нормативными документами*; рекомендуемая поверхностная плотность материала — не менее 350 г/м²; гидрофобный

Примечание. Нормативные документы* перечислены по ссылке¹.

Note. The regulatory documents* are listed at the link.

Экспериментальная модель паллеты с пищевой продукцией (Рисунок 2) включала:

- (1) имитаторы продукции — вареная гречневая крупа, подобранная по объему и теплофизическим свойствам, эквивалентным характеристикам стандартной паллеты, полностью загруженной готовой охлажденной пищевой продукцией;

Рисунок 2

Экспериментальная модель паллеты с пищевой продукцией

Figure 2

Experimental Pallet Model Loaded with Food Products

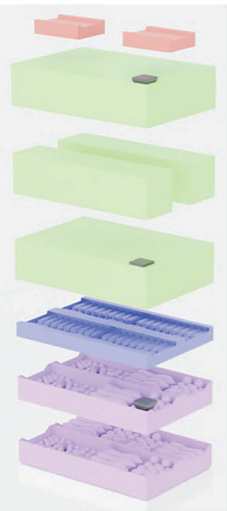


Схема паллеты



Общий вид паллеты

- (2) реальные продукты — охлажденные кулинарные изделия из мяса птицы (салат «Оливье», фасовка 200 г, 7 шт.), размещенные в зонах установки датчиков температуры для ее контроля и регистрации.

Данный подход обеспечил соответствие экспериментальной модели реальным условиям логистики скоропортящихся пищевых продуктов.

Процедура исследования

Измерение теплофизических характеристик

Метод измерения плотности теплового потока заключался в закреплении термочехлов на переносной холодильный ларь для создания разницы температур (ΔT , К) на внутренней (T_1 , К) и внешней (T_2 , К) поверхностях термочехла. На внутренней поверхности с помощью термопасты КПТ8 закрепляли термометр сопротивления (датчик температуры) и один из датчиков теплово-

¹ Федеральный закон от 30.03.99 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;

Федеральный закон от 02.01.2000 № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов»;

СанПиН 2.3.5.021–94 «Санитарные правила для предприятий продовольственной торговли»;

Инструкция по санитарной обработке специализированного подвижного состава и контейнеров, занятых на перевозке пищевых продуктов, утвержденная заместителем министра здравоохранения РСФСР 3 мая 1978 г.;

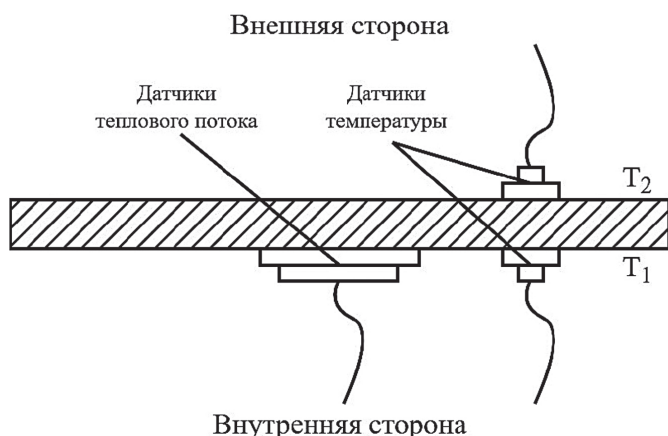
Инструкция по дезинфекции санитарного автотранспорта при различных температурных условиях № 835-70 от 06.01.70, утвержденная начальником Главного санитарно-эпидемиологического управления Министерства здравоохранения СССР.

Рисунок 3

Расположение датчиков на полотне термочехла

Figure 3

Placement of Sensors on the Thermal Cover Fabric



го потока. Аналогично датчик температуры закрепляли снаружи таким образом, чтобы внешний датчик располагался напротив внутреннего (Рисунок 3).

Обеспечивали разность температур наружной и внутренней поверхностей термочехла на уровне 15,0; 20,0 и 25,0°C. Каждый режим выдерживали до достижения установившейся температуры, подтвержденной показаниями датчиков в течение не менее 30 мин.

Расчет коэффициента теплопередачи

После анализа результатов исследования теплового потока рассчитывали коэффициент теплопередачи для каждого термочехла.

Исследование продолжительности хранения

Исследование выполняли в теплоизолированной камере при имитации кратковременных изменений температурного режима, соответствующих погрузочно-разгрузочным операциям:

- (1) предварительное охлаждение паллеты с продукцией до температуры от 1,0 до 3,0°C;
- (2) установка паллеты в теплоизолированной камере и размещение датчиков температуры в зоне реальных пищевых образцов;
- (3) накрытие паллеты исследуемым термочехлом с плотным прилеганием;
- (4) кратковременная стабилизация (≤ 5 мин) для установления условий;

- (5) включение тепловентиляторов, моделирующих внешнюю температуру 30,0°C;
- (6) непрерывная регистрация температуры продукта в течение 12 ч;
- (7) продолжительность хранения, за которую температура в контрольной точке продукта достигала критического порогового значения (7,0°C), определяли на основе анализа зарегистрированных термограмм.

Каждый из образцов термочехлов проходил три повторных испытания, что обеспечило статистическую надежность полученных данных.

Оборудование

Для создания разницы температур при определении плотности теплового потока использовали переносной холодильный ларь Meyvel AF-H120 («Meyvel», Китай).

Плотность теплового потока определяли с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «Поток» (ООО «СКБ Стройприбор», Россия), основные технические характеристики которого представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики ИТП-МГ4.03 «Поток»

Table 2

Main Technical Specifications of the Flow Density Heat Flux and Temperature Meter 4.03 Potok

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений: – плотности теплового потока, Вт/м ² – температуры, °C	От 10 до 999 От минус 30 до 100
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения плотности теплового потока, %	$\pm 6,0$
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения температуры, °C, в диапазоне: – от минус 30 до 80 °C – от 80 до 100 °C	$\pm 0,2$ $\pm 0,5$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения плотности теплового потока, вызванной отклонением температуры датчиков теплового потока от 20 °C (на каждые 10 °C отклонения), %	$\pm 0,5$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения температуры, вызванной отклонением температуры электронного блока от 20 °C (на каждые 10 °C отклонения), °C	$\pm 0,05$

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

Контроль и регистрацию температуры охлажденной продукции и окружающей среды (воздух) производили с помощью двух 12-канальных электронных измерителей-регистраторов «Термодат-25М5» (ООО НПП «Системы контроля», Россия) с программным обеспечением TermodatNet (частота опроса — 1 раз/мин) с преобразователями термоэлектрическими ТПК011 (ООО «КИПСервис», Россия) в количестве 24 шт., основные технические характеристики которых представлены в Таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3
Основные технические характеристики измерителя-регистратора температуры «Термодат-25М5»

Table 3 Main Technical Specifications of the Temperature Controller Thermodat 25m5	
Диапазон измерения, °C	От минус 270 до 2500
Измерительные универсальные входы, шт.	До 12
Класс точности	0,25
Разрешающая способность при измерении температуры, °C	0,1
Компенсация температуры холодного спая	Автоматическая
Регистрация в Государственном реестре средств измерений РФ	№ 17602-09

Таблица 4
Основные технические характеристики преобразователей термоэлектрических ТПК011

Table 4 Main Technical Specifications of TPK011 Thermoelectric Converters	
Тип термопары	Хромель-алюмель
Диапазон измеряемых температур, °C	От минус 40 до 800
Показатель тепловой инерции, с, не более	3
Диаметр термоэлектрода, мм	0,5

Для нагрева воздуха в теплоизолированной камере применяли тепловентиляторы Ballu BFH/S-04 («Ballu», Китай).

Методы

Теплоизоляционные свойства термочехлов оценивали по коэффициенту теплопередачи (Ткаченко, 2017), рассчитанному на основе экспериментально измеренной

плотности теплового потока и разности температур внутренней и внешней поверхностей термочехла:

$$k = \frac{q}{\Delta T},$$

где k — коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К));
 q — плотность теплового потока (Вт/м²);
 ΔT — разность температур внутренней и внешней поверхностей термочехлов (К).

Температурный мониторинг проводили с использованием термограмм, отражающих динамику изменения температуры продукта под термочехлом, для оценки его способности поддерживать безопасную температуру продукции при внешних тепловых нагрузках.

Анализ данных

Обработку и анализ экспериментальных данных проводили в программном обеспечении Microsoft Excel 2024:

- (1) усреднение результатов трех повторных измерений для каждого типа термочехла;
- (2) расчет среднего значения и стандартного отклонения для коэффициента теплопередачи;
- (3) визуализация вариативности данных с помощью диаграмм с линиями погрешностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели исследования получены экспериментальные данные по теплофизическим характеристикам шести типов термочехлов и оценена их эффективность в условиях имитации погрузочно-разгрузочных операций.

Теплофизические характеристики термочехлов при стационарном тепловом потоке

В ходе экспериментов определена плотность теплового потока через шесть образцов трехслойных термочехлов при фиксированных перепадах температур: 15,0; 20,0 и 25,0 °C. Измерения выполнены в трехкратной повторности. Полученные значения представлены в Таблице 5.

На основе полученных данных о плотности теплового потока при трех перепадах температур рассчита-

Таблица 5

**Плотность теплового потока через термочехлы
при различных температурных перепадах**

Table 5

**Heat Flux Density through Thermal Covers under Various
Temperature Differentials**

Термочехол	Плотность теплового потока q , Вт/м ² , при перепаде температур ΔT , °C		
	15,0	20,0	25,0
№ 1	12,7 ± 0,6	15,3 ± 0,6	17,7 ± 0,6
№ 2	11,3 ± 0,6	14,3 ± 1,2	16,7 ± 0,6
№ 3	17,7 ± 0,6	20,7 ± 0,6	26,7 ± 1,2
№ 4	13,7 ± 0,6	18,3 ± 0,6	23,3 ± 0,6
№ 5	14,7 ± 0,6	18,3 ± 0,6	21,3 ± 0,6
№ 6	10,3 ± 0,6	12,7 ± 0,6	14,3 ± 0,6

ны средние значения коэффициента теплопередачи для каждого термочехла. Результаты представлены на Рисунке 4.

Динамика температуры пищевого продукта при имитации погрузочно-разгрузочных операций

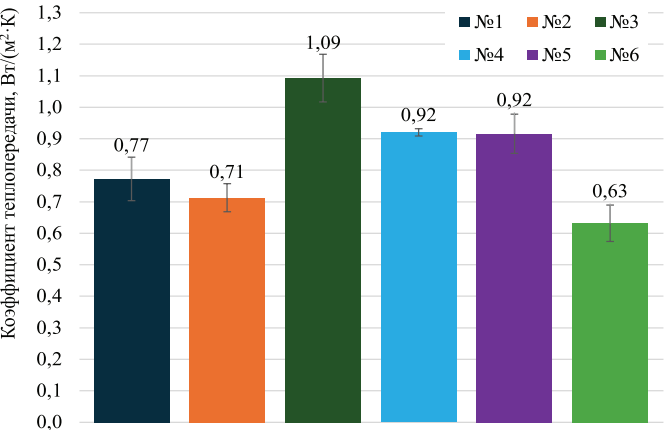
Перед основным этапом испытаний было проведено предварительное исследование на термочехле № 2,

Рисунок 4

**Средние значения коэффициента теплопередачи
различных типов термочехлов**

Figure 4

**Average Values of the Heat Transfer Coefficient for Different
Types of Thermal Covers**



в ходе которого регистрировалась температура реальных пищевых продуктов (салата «Оливье») одновременно в трех зонах паллеты: нижней, средней и верхней при температуре окружающей среды 30,0 °C.

Анализ термограмм (Рисунок 5) показал, что критическая температура продукции (7,0 °C) достигается значительно быстрее в верхней части паллеты, что обусловлено влиянием естественной конвекции, при которой теплый воздух скапливается у верхних слоев паллеты,

Рисунок 5

**Термограммы образцов продукта в нижней, средней и верхней зонах
паллеты с применением термочехла № 2**

Figure 5

**Thermograms of Product Samples in the Lower, Middle, and Upper Zones
of the Pallet Covered with Thermal Cover № 2**

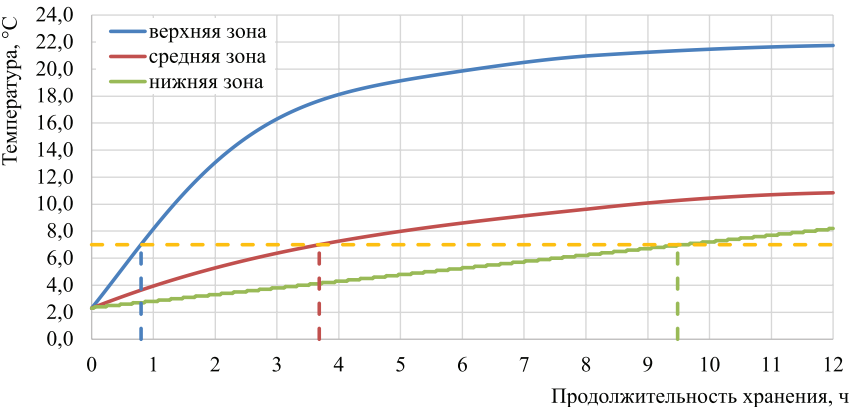
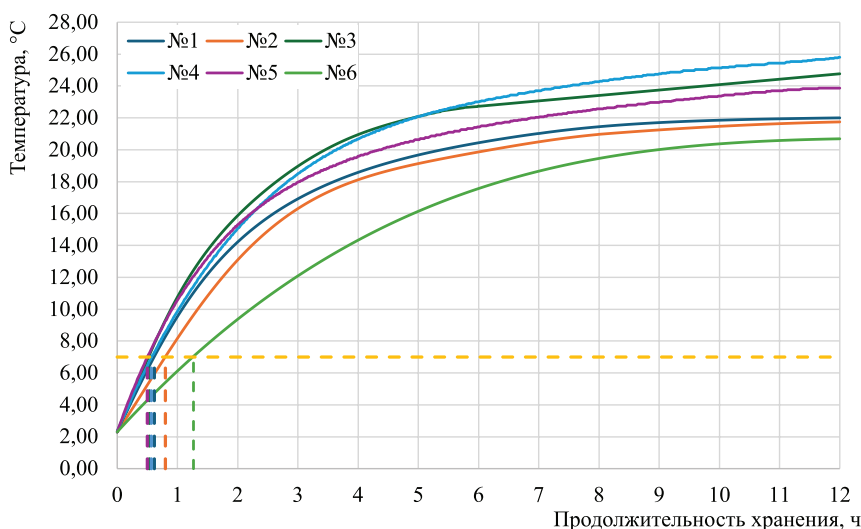


Рисунок 6

Термограммы образцов продукта в верхней зоне паллеты

Figure 6

Thermograms of Product Samples in the Upper Zone of the Pallet



а также повышенной радиационной и конвективной нагрузкой на эту зону со стороны окружающей среды. Исходя из этого, для обеспечения надежной и показательной оценки эффективности термочехлов в последующих испытаниях контрольные измерения температуры проводились исключительно на продуктах, расположенных в верхней части паллеты.

На следующем этапе исследования проведена оценка эффективности термочехлов при хранении пищевой продукции в условиях, имитирующих погрузочно-разгрузочные операции. В ходе эксперимента регистрировалась продолжительность хранения, за которую температура в контрольной точке продукта повышалась от начального уровня (от 1,0 до 3,0 °C) до критического порогового значения (7,0 °C) при температуре окружающей среды 30,0 °C в течение 12 ч. Результаты представлены в виде термограмм, отражающих изменение температуры продукта в верхней (Рисунок 6) зоне паллеты.

В результате полученных данных установлены зависимости между теплоизоляционными свойствами термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений температурного режима (Рисунок 7).

Для оценки потенциала повышения эффективности термозащиты была проведена дополнительная серия экспериментов с использованием наихудшего по изо-

Рисунок 7

Зависимость продолжительности сохранения безопасной температуры пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений температурного режима от теплоизоляционных свойств термочехлов

Figure 7

Dependence of the Duration of Safe Temperature Retention in Food Products under Simulated Short-Term Temperature Disruptions on the Thermal Insulation Properties of Thermal Covers

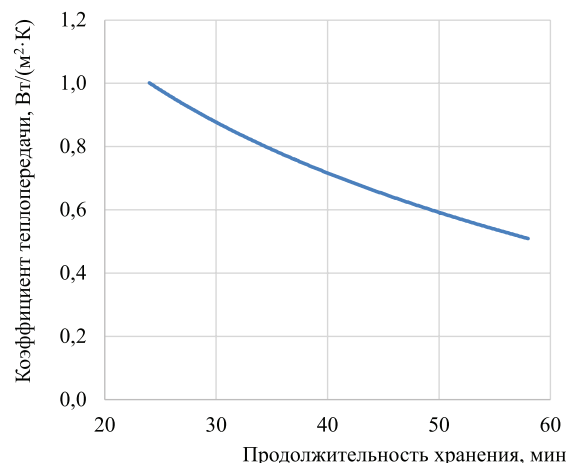
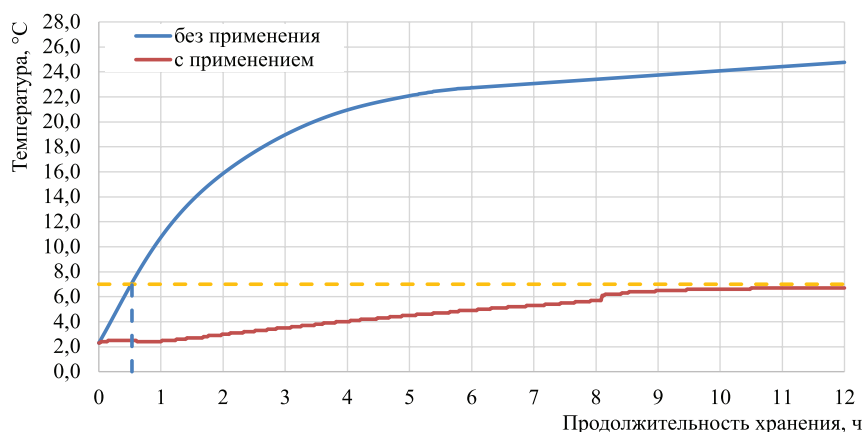


Рисунок 8

**Термограммы образцов продукта в верхней зоне паллеты под
термочехлом № 3 с применением аккумуляторов холода и без него**

Figure 8

**Thermograms of Product Samples in the Upper Zone of the Pallet under
Thermal Cover № 3, with and without the Use of Phase-Change Cold Packs
(Coolant Packs)**



ляционным свойствам термочехла № 3 в комбинации с тремя аккумуляторами холода, предварительно охлажденными до температуры минус 18,0°C. Аккумуляторы размещали в верхней зоне паллеты — области, где, как было установлено ранее, продукт быстрее всего достигает критической температуры. В ходе испытаний при тех же условиях (внешняя температура 30,0°C, продолжительность 12 ч) температура продукта в верхней части паллеты не превысила 7,0°C, что демонстрирует высокую эффективность данного подхода к термозащите (Рисунок 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные подтверждают ключевую роль теплофизических характеристик термочехлов в формировании термостабильности скоропортящейся пищевой продукции при кратковременных нарушениях температурного режима, характерных для погрузочно-разгрузочных операций. Разница в коэффициенте теплопередачи (k) в 0,46 Вт/(м² · К) (с 0,63 до 1,09) привела к сокращению продолжительности сохранения безопасной температуры ($\leq 7,0^\circ\text{C}$) более чем в два раза (с 58 до 28 мин). Незначительное увеличение k вызывает ускоренное накопление тепловой энергии и, как следствие, быстрый выход температуры продукции за критический порог. Установленная зависимость

между коэффициентом теплопередачи и продолжительностью сохранения безопасной температуры позволяет рассматривать данные параметры как количественно обоснованный критерий выбора пассивных средств термозащиты в холодильной цепи.

Критическая роль верхней зоны паллеты обусловлена совокупностью факторов конвективного и радиационного теплообмена. Во-первых, в условиях имитации погрузочно-разгрузочных работ и промежуточного хранения (температура окружающей среды 30,0°C) теплый воздух, имеющий меньшую плотность, стремится вверх, создавая зону повышенной тепловой нагрузки в верхней части грузового пространства. Во-вторых, верхняя поверхность паллеты имеет максимальную площадь контакта с этим нагретым воздушным слоем. Таким образом, наиболее уязвимой является именно верхняя зона системы термозащиты, и ее мониторинг обеспечивает наиболее надежную оценку эффективности термочехла.

Настоящее исследование вносит конкретный вклад в развитие теории и практики холодильной цепи, дополняя и уточняя ранее полученные результаты. Работы Hoang (2011) и Ndraha (2018) качественно описывают риски температурных нарушений, а исследования Kornienko (2020) и Abbas (2023) подтверждают общую тенденцию — снижение k увеличивает срок безопас-

ного хранения. Однако настоящая работа впервые предоставляет экспериментально верифицированную количественную связь между базовым теплофизическим параметром k и ключевым операционным показателем (продолжительностью сохранения температуры продукции) в условиях уязвимого и динамичного участка цепи поставок. Кроме того, эмпирически доказано влияние зонирования паллеты на эффективность термозащиты, что позволяет перейти от усредненной оценки к точечному контролю.

Практическая ценность результатов носит прикладной характер:

- для логистических операторов данные позволяют рассчитывать допустимую продолжительность погрузочно-разгрузочных работ и выбирать термочехлы, гарантирующие соблюдение температурного режима на конкретном маршруте;
- для производителей упаковки работа задает четкий технический критерий (целевой диапазон k) для разработки новых, более эффективных материалов;
- для ритейлеров и производителей пищевой продукции результаты дают возможность принимать обоснованные управленческие решения при выборе поставщиков логистических услуг и упаковочных решений, напрямую влияя на качество, безопасность продукции и минимизацию экономических потерь.

Выявленная эффективность комбинированного применения термочехлов и аккумуляторов холода указывает на перспективность гибридных систем термозащиты как инструмента повышения устойчивости холодильной цепи на уязвимых этапах логистики. Данный подход может быть использован при проектировании технологических регламентов транспортирования и временного хранения скоропортящейся продукции.

Полученные результаты формируют основу для дальнейших исследований, направленных на моделирование нестационарных тепловых процессов в условиях реальной логистической среды, а также на разработку прогнозных цифровых моделей оценки остаточного ресурса температурной устойчивости продукции. Эти направления представляются особенно значимыми в контексте цифровизации холодильной логистики и внедрения интеллектуальных систем мониторинга.

Тем самым проведенное исследование логически приводит к необходимости практической реализации по-

лученных выводов, что обуславливает содержание последующего раздела, посвященного формированию итоговых выводов и рекомендаций.

Ограничения

Испытания проводились при фиксированной внешней температуре (30,0° C) без учета таких факторов реальной логистической среды, как солнечная радиация, ветровая нагрузка и колебания температуры. Эти факторы, как правило, усиливают теплопередачу, что может привести к занижению реальной продолжительности сохранения безопасной температуры продукции.

Также следует отметить, что эксперимент проводился при условии плотной укладки продукции, минимизирующей межпродуктовые воздушные полости. В реальных логистических условиях при укладке зачастую образуются зазоры, что приводит к формированию внутренних конвективных потоков воздуха в объеме паллеты. Данные потоки интенсифицируют процесс переноса тепла от наружной поверхности термочехла к поверхности продукции.

Таким образом, полученные данные отражают наиболее благоприятный (контролируемый) сценарий. В реальных условиях эффективность термочехлов может быть как ниже, так и выше, в зависимости от совокупного влияния микроклимата и конструктивных особенностей груза, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных полевых исследований для верификации лабораторных данных и разработки корректирующих коэффициентов для практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования экспериментально подтверждена определяющая роль теплофизических характеристик термочехлов в обеспечении температурной устойчивости скоропортящейся пищевой продукции при кратковременных нарушениях температурного режима, характерных для погрузочно-разгрузочных операций. Установленная количественная зависимость между коэффициентом теплопередачи и продолжительностью сохранения безопасной температуры позволяет рассматривать данный показатель как объективный критерий оценки эффективности пассивных средств термозащиты в холодильной цепи.

Экспериментально показано, что комбинированное применение термочехлов и аккумуляторов холода обеспечивает принципиально более высокий уровень термостабильности продукции по сравнению с использованием только пассивной термоизоляции, что открывает возможности для проектирования гибридных систем термозащиты в логистике скоропортящихся продуктов.

Практическая значимость работы заключается в возможности прогнозирования эффективности термочехлов на этапе лабораторных испытаний по их базовым теплофизическим характеристикам, что может быть использовано логистическими операторами, производителями упаковочных материалов и предприятиями розничной торговли при выборе решений для обеспечения устойчивости холодильной цепи.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальных условий, моделированием нестационарных климатических воздействий и интеграцией термочехлов с цифровыми системами мониторинга, что позволит перейти от статической оценки термозащиты к динамическому прогнозированию остаточного температурного ресурса продукции в реальном времени.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Никитин Владимир Владиславович: администрирование проекта, администрирование данных, концептуализация, создание рукописи и её редактирование.

Сучков Александр Николаевич: руководство исследованием, методология, ресурсы создание рукописи и её редактирование.

Савицкий Роман Борисович: формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи.

Онацкий Илья Тимурович: верификация данных, проведение исследования, визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Nikitin Vladimir Vladislavovich: project administration, data curation, conceptualization, writing—original draft, and writing—review & editing.

Suchkov Aleksandr Nikolaevich: supervision, methodology, resources, writing—original draft, and writing—review & editing.

Savitskiy Roman Borisovich: formal analysis, investigation, writing—original draft.

Onatskiy Ilya Timurovich: data validation, investigation, visualization.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев, С. П. (2016). Холодильная цепь — основа обеспечения качества и конкурентоспособности российской пищевой продукции. *Холодильная техника*, (7), 48–52. <https://doi.org/10.17816/RF99121>
- Бараненко, А. В., & Белозеров, Г. А. (2010). Непрерывная холодильная цепь — основа стратегии ресурсосбережения и обеспечения качества продовольствия. *Холодильная техника*, (3), 9–12. <https://doi.org/10.17816/RF97771>
- Белозеров, Г. А., & Большаков, О. В. (2007). Системный анализ непрерывной холодильной цепи. *Пищевая промышленность*, (4), 40–42.
- Белозеров, Г. А. (2012). Непрерывная холодильная цепь. *Мясные технологии*, (5), 47–49.
- Большаков, О. В. (1998). *Научное и инженерное обеспечение мясной промышленности*. Пищепромиздат
- Ворон, О. А., & Морчиладзе, И. Г. (2014). Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи. Транспорт Российской Федерации. *Журнал о науке, практике, экономике*, (1), 40–45
- Корниенко, В. Н., Грызунов, А. А., & Авилова, С. В. (2018). Поддержание температурных режимов при внутригородских перевозках охлажденной мясной продукции. *Все о мясе*, (4), 56–60.
- Корниенко, В. Н., Петров, В. В., & Горбунова, Н. А. (2021). Контроль температурных режимов в непрерывной холодильной цепи оборота мяса и мясной продукции. *Все о мясе*, (5), 54–60. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-5-54-60>

- Настасиевич, И., Лакицевич, Б., & Петрович, З. (2017). Управление холодильной цепью при поставках мяса: «старые» и новые стратегии. *Теория и практика переработки мяса*, 2(4), 20–34. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-4-20-34>
- Никитин, В. В., & Сучков, А. Н. (2025). Динамика сохранности свежего перца в условиях, имитирующих холодильную цепь. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(2), 57–75. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.2.640>
- Румянцева, О. Н. (2009). Оценка влияния параметров холодильной цепи на сохранение качества, экологической безопасности и рациональность использования пищевых продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*, (1), 37–44.
- Тертеров, М. Н. (1981). Проблемы развития непрерывной холодильной цепи. *Холодильная техника*, (10), 13–17.
- Ткаченко, Л. А., & Репина, А. В. (2017). *Теория теплообмена* (Н. Ф. Кашапов, Ред.). Казань: Издательство Казанского университета.
- Тяпухин, А. П. (2018). *Логистика. Управление цепями поставок*. КНОРУС
- Тяпухин, А. П. (2020). *Логистика*. Юрайт.
- Тяпухин, А. П., Коловертнова, М. Ю., & Гусева, Е. П. (2021). Сущность и содержание логистического подхода к снижению продовольственных потерь. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*, (2), 85–98. <https://doi.org/10.17308/econ.2021.2/3382>
- Щачек, Т. М., Зеленкова, Е. Н., Травкина, С. Г., Пенкрат, А. С., & Мешкова, А. С. (2023). Планирование эксперимента при оценке сроков годности пищевой продукции. Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 265(1), 5–14. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-1>
- Abbas, H., Zhao, L., Gong, X., & Faiz, N. (2023). The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, Article 101562. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>
- Ali, I., Nagalingam, S., & Gurd, B. (2018). A resilience model for cold chain logistics of perishable products. *The International Journal of Logistics Management*, 29(3), 922–941. <https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2017-0230>
- Bai, Y., Wu, H., Huang, M., Luo, J., & Yang, Z. (2023). How to build a cold chain supply chain system for fresh agricultural products through blockchain technology — A study of tripartite evolutionary game theory based on prospect theory. *PLOS ONE*, 18(11), Article e0294520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294520>
- Bal, M., & Pawlicka, K. (2021). Supply chain finance and challenges of modern supply chains. *LogForum*, 17(1), 71–82. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.525>
- Dai, J., Che, W., Lim, J. J., & Shou, Y. (2020). Service innovation of cold chain logistics service providers: A multiple-case study in China. *Industrial Marketing Management*, 89, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.05.013>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e00.htm>
- Han, J. W., Zuo, M., Zhu, W. Y., Zuo, J. H., Lü, E. L., & Yang, X. T. (2021). A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.039>
- Hoang, H. M., Flick, D., Alvarez, G., & Laguerre, O. (2011). Evaluation of food safety along the cold chain by deterministic and stochastic approaches. In *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR 2011)*. Prague, Czech Republic. HAL CCSD.
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., Nikolaev, N. S., Motin, V. V., & Kazakova, N. V. (2020). Heat and mass exchanging processes in a refrigerated truck body during multi-drop urban distribution of fresh herbs. *Revista San Gregorio*, 1(37), 61–74. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i37.1251>
- Latha, D. S., & Samanchuen, T. (2023). Development of reference process model and reference architecture for pharmaceutical cold chain. *Sustainability*, 15(5), Article 3935. <https://doi.org/10.3390/su15053935>
- Lei, Y., Zhang, Y., Cheng, Y., Huang, J., & Huang, M. (2023). Monitoring and identification of spoilage-related microorganisms in braised chicken with modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *Food Science and Human Wellness*, 12(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.015>

- Li, F., Ai, W., & Ju, T. (2022). Cold chain logistics distribution path planning of fresh products in Beijing subcenter. *Sustainability*, 14(17), Article 10622. <https://doi.org/10.3390/su141710622>
- Lu, L., Hu, S., Ren, Y., Kang, K., & Li, B. (2022). Research on extension design of emergency cold chain logistics from the perspective of carbon constraints. *Sustainability*, 14(15), Article 9083. <https://doi.org/10.3390/su14159083>
- Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vljajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, 89, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Nychas, G. J. E., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., & Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science*, 78(1–2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.020>
- Onwude, D., Motmans, T., Shoji, K., Evangelista, R., Gajardo, J., Odion, D., ... & Defraeye, T. (2023). Bottlenecks in Nigeria's fresh food supply chain: What is the way forward? *Trends in Food Science & Technology*, 137, 55–62. <https://doi.org/10.31224/2447>
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Raab, V., Petersen, B., & Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, 113(9), 1267–1289. <https://doi.org/10.1108/000707011111177683>
- Ren, T., Ren, J., Matellini, D. B., & Ouyang, W. (2022). A comprehensive review of modern cold chain shipping solutions. *Sustainability*, 14(22), Article 14746. <https://doi.org/10.3390/su142214746>
- Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2016). Colombian-Swiss research to help feed the planet: From Green Revolution to Microbial Revolution. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 297–303. <https://doi.org/10.15446/ABC.V21N1SUP.50856>
- Stuart, T. (2009). *Waste: Uncovering the global food scandal*. Penguin Books
- Tan, S., & Zhang, X. (2025). Preparation of organic ternary phase change materials for fruit and vegetable cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 108, Article 115067. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115067>
- Wang, L., Liu, G., & Ahmad, I. (2024). Cost optimization model design of fresh food cold chain system in the context of big data. *Big Data Research*, 35, Article 100417. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2024.100417>
- Wang, J., Zhang, X., Wang, X., Huang, H., Hu, J., & Lin, W. (2022). A data-driven packaging efficiency optimization method for a low carbon system in agri-products cold chain. *Sustainability*, 14(2), Article 858. <https://doi.org/10.3390/su14020858>
- Yan, H., Song, M. J., & Lee, H. Y. (2021). A systematic review of factors affecting food loss and waste and sustainable mitigation strategies: A logistics service providers' perspective. *Sustainability*, 13(20), Article 11374. <https://doi.org/10.3390/su132011374>
- Yang, S., Xiao, Y., Zheng, Y., & Liu, Y. (2017). The green supply chain design and marketing strategy for perishable food based on temperature control. *Sustainability*, 9(9), Article 1511. <https://doi.org/10.3390/app15020770>
- Zhang, H., Qiu, B., & Zhang, K. (2017). A new risk assessment model for agricultural products cold chain logistics. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9), 1800–1816. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2017-0025>
- Zhang, Y., Ye, C., & Geng, X. (2022). A hesitant fuzzy method for evaluating risky cold chain suppliers based on an improved TODIM. *Sustainability*, 14(16), Article 10152. <https://doi.org/10.3390/su141610152>
- Zhao, F., Wei, Z., Zhou, G., Kristiansen, K., & Wang, C. (2022). Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat. *Foods*, 11(15), Article 2307. <https://doi.org/10.3390/foods11152307>
- Zheng, C., Sun, K., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2022). Multimodal transport path selection of cold chain logistics based on improved particle swarm optimization algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 5458760. <https://doi.org/10.1155/2022/5458760>

REFERENCES

- Andreev, S. P. (2016). Cold chain — the foundation for ensuring quality and competitiveness of Russian food products. *Refrigeration Engineering*, (7), 48–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/RF99121>
- Baranenkov, A. V., & Belozеров, G. A. (2010). Continuous cold chain — the foundation of a resource-saving strategy and food quality assurance. *Refrigeration Engineering*, (3), 9–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/RF97771>
- Belozеров, G. A., & Bol'shakov, O. V. (2007). System analysis of the continuous cold chain. *Food Industry*, (4), 40–42. (In Russ.)
- Belozеров, G. A. (2012). Continuous cold chain. *Meat Technologies*, (5), 47–49. (In Russ.)
- Bol'shakov, O. V. (1998). *Scientific and engineering support of the meat industry*. Food Industry Publishing House. (In Russ.)
- Voron, O. A., & Morchiladze, I. G. (2014). Aspects of improving railway transportation of perishable goods within a continuous cold chain. *Transport of the Russian Federation. Journal on Science, Practice, and Economics*, (1), 40–45. (In Russ.)
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., & Avilova, S. V. (2018). Maintenance of temperature regimes during the intracity transportation of the chilled meat products. *Vsyo o myase*, (4), 56–60. (In Russ.)
- Kornienko, V. N., Petrov V. V., & Gorbunova N. A. (2021). Control of temperature regimes in the continuous cold chain of meat and meat product turnover. *Vsyo o myase*, (5), 54–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-5-54-60>
- Nastasijevic I., Lakicevic B., Petrovic Z. (2017). Cold chain management in meat supply: «old» and novel strategies. *Theory and Practice of Meat Processing*, 2(4), 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-4-20-34>
- Nikitin, V. V., & Suchkov, A. N. (2025). Dynamics of fresh pepper preservation under conditions simulating the cold chain. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), 57–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.640>
- Rumyantseva, O. N. (2009). Assessment of the impact of cold chain parameters on quality preservation, environmental safety, and efficient use of food products. *Scientific Journal of ITMO University. Series "Economics and Environmental Management"*, (1), 37–44. (In Russ.)
- Terterov, M. N. (1981). Problems of developing a continuous cold chain. *Refrigeration Engineering*, (10), 13–17. (In Russ.)
- Tkachenko, L. A., & Repina, A. V. (2017). *Theory of heat transfer*. Kazan: Kazan University Press. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P. (2018). *Logistics. Supply Chain Management*. KNORUS. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P. (2020). *Logistics*. Yurayt. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P., Kolovertnova, M. Y., & Guseva, E. P. (2021). The essence and content of the logistics approach to reducing food losses. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, (2), 85–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/econ.2021.2/3382>
- Shachek, T. M., Zelenkova, E. N., Travkina, S. G., Penkrat, A. S., & Meshkova, A. S. (2023). Experimental design in shelf-life assessment of food products. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geocology*, 265(1), 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-1>
- Abbas, H., Zhao, L., Gong, X., & Faiz, N. (2023). The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, Article 101562. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>
- Ali, I., Nagalingam, S., & Gurd, B. (2018). A resilience model for cold chain logistics of perishable products. *The International Journal of Logistics Management*, 29(3), 922–941. <https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2017-0230>

- Bai, Y., Wu, H., Huang, M., Luo, J., & Yang, Z. (2023). How to build a cold chain supply chain system for fresh agricultural products through blockchain technology—A study of tripartite evolutionary game theory based on prospect theory. *PLOS ONE*, 18(11), Article e0294520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294520>
- Bal, M., & Pawlicka, K. (2021). Supply chain finance and challenges of modern supply chains. *LogForum*, 17(1), 71–82. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.525>
- Dai, J., Che, W., Lim, J. J., & Shou, Y. (2020). Service innovation of cold chain logistics service providers: A multiple-case study in China. *Industrial Marketing Management*, 89, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.05.013>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e00.htm>
- Han, J. W., Zuo, M., Zhu, W. Y., Zuo, J. H., Lü, E. L., & Yang, X. T. (2021). A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.039>
- Hoang, H. M., Flick, D., Alvarez, G., & Laguerre, O. (2011). Evaluation of food safety along the cold chain by deterministic and stochastic approaches. In Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR 2011). Prague, Czech Republic. HAL CCSD.
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., Nikolaev, N. S., Motin, V. V., & Kazakova, N. V. (2020). Heat and mass exchanging processes in a refrigerated truck body during multi-drop urban distribution of fresh herbs. *Revista San Gregorio*, 1(37), 61–74. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i37.1251>
- Latha, D. S., & Samanchuen, T. (2023). Development of reference process model and reference architecture for pharmaceutical cold chain. *Sustainability*, 15(5), Article 3935. <https://doi.org/10.3390/su15053935>
- Lei, Y., Zhang, Y., Cheng, Y., Huang, J., & Huang, M. (2023). Monitoring and identification of spoilage-related microorganisms in braised chicken with modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *Food Science and Human Wellness*, 12(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.015>
- Li, F., Ai, W., & Ju, T. (2022). Cold chain logistics distribution path planning of fresh products in Beijing subcenter. *Sustainability*, 14(17), Article 10622. <https://doi.org/10.3390/su141710622>
- Lu, L., Hu, S., Ren, Y., Kang, K., & Li, B. (2022). Research on extension design of emergency cold chain logistics from the perspective of carbon constraints. *Sustainability*, 14(15), Article 9083. <https://doi.org/10.3390/su14159083>
- Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vlajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, 89, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Nychas, G. J. E., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., & Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science*, 78(1–2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.020>
- Onwude, D., Motmans, T., Shoji, K., Evangelista, R., Gajardo, J., Odion, D., ... & Defraeye, T. (2023). Bottlenecks in Nigeria's fresh food supply chain: What is the way forward? *Trends in Food Science & Technology*, 137, 55–62. <https://doi.org/10.31224/2447>
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Raab, V., Petersen, B., & Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, 113(9), 1267–1289. <https://doi.org/10.1108/000707011111177683>
- Ren, T., Ren, J., Matellini, D. B., & Ouyang, W. (2022). A comprehensive review of modern cold chain shipping solutions. *Sustainability*, 14(22), Article 14746. <https://doi.org/10.3390/su142214746>
- Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2016). Colombian-Swiss research to help feed the planet: From Green Revolution to Microbial Revolution. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 297–303. <https://doi.org/10.15446/ABC.V21N1SUP.50856>
- Stuart, T. (2009). *Waste: Uncovering the global food scandal*. Penguin Books

- Tan, S., & Zhang, X. (2025). Preparation of organic ternary phase change materials for fruit and vegetable cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 108, Article 115067. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115067>
- Wang, L., Liu, G., & Ahmad, I. (2024). Cost optimization model design of fresh food cold chain system in the context of big data. *Big Data Research*, 35, Article 100417. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2024.100417>
- Wang, J., Zhang, X., Wang, X., Huang, H., Hu, J., & Lin, W. (2022). A data-driven packaging efficiency optimization method for a low carbon system in agri-products cold chain. *Sustainability*, 14(2), Article 858. <https://doi.org/10.3390/su14020858>
- Yan, H., Song, M. J., & Lee, H. Y. (2021). A systematic review of factors affecting food loss and waste and sustainable mitigation strategies: A logistics service providers' perspective. *Sustainability*, 13(20), Article 11374. <https://doi.org/10.3390/su132011374>
- Yang, S., Xiao, Y., Zheng, Y., & Liu, Y. (2017). The green supply chain design and marketing strategy for perishable food based on temperature control. *Sustainability*, 9(9), Article 1511. <https://doi.org/10.3390/app15020770>
- Zhang, H., Qiu, B., & Zhang, K. (2017). A new risk assessment model for agricultural products cold chain logistics. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9), 1800–1816. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2017-0025>
- Zhang, Y., Ye, C., & Geng, X. (2022). A hesitant fuzzy method for evaluating risky cold chain suppliers based on an improved TODIM. *Sustainability*, 14(16), Article 10152. <https://doi.org/10.3390/su141610152>
- Zhao, F., Wei, Z., Zhou, G., Kristiansen, K., & Wang, C. (2022). Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat. *Foods*, 11(15), Article 2307. <https://doi.org/10.3390/foods11152307>
- Zheng, C., Sun, K., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2022). Multimodal transport path selection of cold chain logistics based on improved particle swarm optimization algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 5458760. <https://doi.org/10.1155/2022/5458760>

ОБ АВТОРАХ

Никитин Владимир Владиславович, научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1584-9483>, Scopus ID: 57205168834, Researcher ID: IST-1061-2023, SPIN-код: 5443-9232, v.nikitin@fncps.ru

Сучков Александр Николаевич, научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-5124>, Scopus ID: 57211623755, Researcher ID: AAE-2184-2019, SPIN-код: 9510-3923, a.suchkov@fncps.ru

Савицкий Роман Борисович, инженер-исследователь ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4889-3472>, Researcher ID: OVZ-0463-2025, SPIN-код: 3705-3690, r.savickiy@fncps.ru

Онацкий Илья Тимурович, младший научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6436-242X>, Researcher ID: IST-1038-2023, SPIN-код: 7761-7069, i.onatskiy@fncps.ru

ABOUT THE AUTHORS

Nikitin Vladimir Vladislavovich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbatoev Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1584-9483>, Scopus ID: 57205168834, Researcher ID: IST-1061-2023, SPIN-код: 5443-9232, v.nikitin@fncps.ru

Suchkov Alexander Nikolaevich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbatoev Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-5124>, Scopus ID: 57211623755, Researcher ID: AAE-2184-2019, SPIN-код: 9510-3923, a.suchkov@fncps.ru

Savitskiy Roman Borisovich, Research Engineer at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbatoev Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4889-3472>, Researcher ID: OVZ-0463-2025, SPIN-код: 3705-3690, r.savitskiy@fncps.ru

Onatskiy Ilya Timurovich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbatoev Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6436-242X>, Researcher ID: IST-1038-2023, SPIN-код: 7761-7069, i.onatskiy@fncps.ru