

УДК 629.06

Тепловые процессы в штабеле скоропортящихся грузов, транспортируемых в отапливаемом изотермическом вагоне

Д-р техн. наук В. И. МОИСЕЕВ¹, д-р техн. наук О. А. ВОРОН^{2*},
А. В. СКОЛОВ³, канд. техн. наук С. В. СТАРОВОЙТОВ²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I

²Ростовский государственный университет путей сообщения

³ООО «Лекма Холод»

*E-mail: rgups_voron@mail.ru

При перевозках скоропортящихся грузов железнодорожным транспортом имеется значительная номенклатура продуктов, для которых в зимний период года точное поддержание температуры в грузовом помещении вагона не требуется. Представлена математическая модель термообработки штабеля скоропортящихся пищевых продуктов, которая описывает процессы теплопередачи при продолжительной транспортировке в отапливаемом изотермическом вагоне (ОИВ). Система обогрева включает использование электрообогревательных элементов и блока тепловых аккумуляторов с большой эквивалентной теплоемкостью, обеспечиваемой фазообратимыми реакциями в теплоаккумулирующем материале. Работа системы отопления вагона сводится к компенсации теплопотерь, зависящих от температуры окружающего воздуха и от теплоизоляционных качеств ограждающих конструкций кузова вагона. Отличительной особенностью предлагаемой модели является рассмотрение характера движения термообработанного воздуха внутри грузового помещения изотермического вагона. Она предназначена для расчета температурных полей в штабеле термочувствительного груза и пристенном пространстве при естественной конвекции воздуха внутри грузового помещения вагона. Методы исследования основаны на уравнениях математической физики и теории подобия. Полученные результаты иллюстрируются на конкретном примере, из практики эксплуатации подвижного состава, для перевозок скоропортящихся грузов. Некоторая коррекция температурного режима, обеспечивается системами обогрева, размещаемыми в стенах и «теплом полу» грузового помещения вагона, создающими естественную конвекцию воздуха, обтекающего штабель. Благодаря новой системе обогрева и отказу от воздуховода может быть увеличена высота и полезный объем грузового помещения изотермического вагона без изменения наружных размеров кузова и габарита подвижного состава, что особенно актуально при перевозках СПГ с малым удельным весом.

Ключевые слова: скоропортящиеся пищевые продукты, изотермический отапливаемый вагон, математическая модель, тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, система обогрева «теплый пол», грузовое помещение.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.03.2025, одобрена после рецензирования 14.05.2025, принята к печати 28.05.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-38-48

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Моисеев В. И., Ворон О. А., Сколов А. В., Старовойтов С. В. Тепловые процессы в штабеле скоропортящихся грузов, транспортируемых в отапливаемом изотермическом вагоне. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 3. С. 38–48. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-38-48

Thermal processes in a stack of perishable goods transported in a heated insulated wagon

D. Sc. V. I. MOISEEV¹, D. Sc. O. A. VORON^{2*}, A. V. SKOLOV³, Ph. D. S. V. STAROVOITOV²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

²Rostov State Transport University

³Lecma Holod Ltd

*E-mail: rgups_voron@mail.ru

When transporting perishable goods by rail, there is a significant range of products for which precise temperature control in the cargo area is not required in winter. A mathematical model of heat treatment for a stack of perishable foodstuffs is presented, which describes the processes of heat transfer during prolonged transportation in a heated insulated wagon. The heating system includes the use of electric heating elements and a block of thermal accumulators with a large equivalent heat capacity provided by phase-reversal reactions in the heat storage material. The operation of the wagon heating system

is reduced to compensation of heat loss, depending on the ambient temperature and on the thermal insulation qualities of the enclosing structures of the wagon body. A distinctive feature of the proposed model is taking into account the nature of the movement of heat-treated air inside the cargo compartment of an insulated wagon. It is designed to calculate temperature fields in a stack of thermosensitive cargo and a wall space with natural air convection inside the cargo compartment of the wagon. The research methods are based on the equations of mathematical physics and the theory of similarity. The results obtained are exemplified by rolling stock operating for the transportation of perishable goods. Some correction of the temperature regime is provided by heating systems located in the walls and underfloor heating of the freight car, creating a natural convection of air flowing around the stack. Due to the use of the new heating system and the abandonment of the duct, the height and useful volume of the cargo compartment of the insulated wagon can be increased without changing the external dimensions of the body, which is especially important for LNG transportation with a low specific gravity.

Keywords: perishable foodstuffs, isothermal wagon, mathematical model, thermal accumulator, heat storage material, underfloor heating, cargo compartment.

Article info:

Received 24/01/2025, approved after reviewing 14/05/2025, accepted 28/05/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-38-48

Article in Russian

For citation:

Moiseev V. I., Voron O. A., Skolov A. V., Starovoitov S. V. Thermal processes in a stack of perishable goods transported in a heated insulated wagon. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 3. p. 38-48. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-38-48

Используемые аббревиатуры и их пояснения:

СПГ — скоропортящиеся грузы (фрукты, овощи, соки и др.) предьявляемые к перевозке;

ИВТ — изотермический вагон-термос — грузовой вагон с тепловой изоляцией ограждения вагона (стен, крыши и пола);

ОИВ — отапливаемый изотермический вагон — грузовой вагон с тепловой изоляцией ограждения вагона с системой обогрева грузового помещения;

ГПИВ — грузовое помещение изотермического вагона;

ТАМ — теплоаккумулирующий материал — вещество с большой эквивалентной теплоемкостью, обусловленной обратимыми процессами «плавление — затвердевание».

Введение

В 2024 г. Минсельхоза был презентован национальный проект «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности», запустить который ведомство рассчитывает в 2025 г. Он является логическим развитием и корректировкой основных положений доктрины продовольственной безопасности РФ. В основных направлениях государственной политики в сфере обеспечения продовольственной безопасности говорится о необходимости повышения экономической доступности качественной пищевой продукции для формирования рациона здорового питания среди всех групп населения [1].

Поэтому еще более актуальным становится вопрос об обеспечении населения разнообразными видами скоропортящихся пищевых продуктов, а это требует организации массовых перевозок свежих, консервированных и замороженных фруктов и овощей, на большие расстояния. Эти перевозки обеспечиваются специализированным изотермическим железнодорожным подвижным составом — вагонами-термосами, рефрижераторными вагонами и крупнотоннажными рефрижераторными контейнерами. Важной технической составляющей функци-

онирования этих типов изотермических вагонов (ИВ) является холодильное оборудование различных типов, благодаря которому в грузовых помещениях может поддерживаться требуемый температурный режим оптимальный для конкретного вида скоропортящегося груза. Энергоэффективность электрического, холодильного и отопительного оборудования на транспорте и других областях холодильной техники рассматривается в работах [2]–[4].

Анализ статистических данных по объемам и видам скоропортящихся грузов (СПГ) показывает, что при их перевозках железнодорожным транспортом существует значительная номенклатура продуктов, для которых точное поддержание температуры в грузовом помещении не требуется. Такая категория грузов получила наименование «термоспригодных».

На базе имеющейся модели изотермического кузова и по аналогии с эксплуатируемыми еще до 80-х годов вагонами — ледниками с пристенными карманами, для поддержания температурного режима в ГПИВ могут быть использованы аккумуляционные системы нагрева и охлаждения.

Они могут быть выполнены в виде нагревательных или охладительных емкостей с эвтектической смесью [5]–[7]. Однако при этом снижается такой важный технический параметр грузового вагона как грузоподъемность. Для основного парка инновационных изотермических вагонов уже сейчас вагоностроители отдают предпочтение тележкам 3 типа с осевой нагрузкой 25 т на ось. При этом полезная нагрузка стала составлять около 60 т, что ранее было недостижимо для изотермического подвижного состава из-за использования под ними тележек с осевой нагрузкой 22 т. Это открывает новые перспективы для рассмотрения вариантов применения вагонов с аккумуляционными системами. Гибрид такой системы, включающей в себя паровую компрессионную машину и тепловой аккумулятор, используется в конструкции рефрижераторных вагонов в Китае [8, 9].

Таблица 1

Примеры температурных условий при погрузке различных типов СПГ

Table 1

Examples of temperature conditions during loading different types of LNG

Наименование груза	Температура груза при погрузке, °С	Физические характеристики воздуха в ГПИВ	
Виноград	16	Кинематическая вязкость, $\nu_g \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	15,06
Вина виноградные, соки овощные, пастеризованные, огурцы, арбузы, дыни	12		
Картофель, кабачки, капуста цветная, чеснок, свекла столовая	9	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$	2,51
Пиво пастеризованное, томаты	8	Температуропроводность, $a \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	20,0
Йогуртные продукты, шпик монолитом, яйца куриные	4	Число Прандтля, Pr (безразмерн.)	0,706

Предлагаемое устройство аккумуляционной системы термостабилизации потребует выбор химического соединения для эвтектического раствора, и одним из возможных вариантов является использование солнечных батарей для энергоснабжения вентиляторов-циркуляторов и циркуляционных насосов, определение места их расположения и т. д. [10, 11].

Поддержание температурного режима в ГПИВ осуществляется теплопроводностью штабеля с грузом и конвекцией воздуха. Однако расчетная модель штабеля в ОИВ имеет существенные отличия от штабеля груза в рефрижераторном вагоне, т. к. здесь изменен принцип поддержания температуры [12, 13].

Для рефрижераторного вагона характерна свободная укладка груза с вентиляционными зазорами и с принудительной циркуляцией воздуха внутри штабеля. Номенклатура пищевых продуктов, перевозимых железнодорожными рефрижераторными вагонами, широка и многообразна, способы их укладки регламентированы Правилами перевозок [14].

Как правило, продукты, предъявляемые к перевозке, имеют более высокую температуру, чем это необходимо для его транспортировки. Поэтому более теплый груз должен быть подвергнут термообработке. Для этого охлажденный в воздухоохладителе воздух проходит через штабель. Скорость охлаждения зависит от вида продукта, теплоемкости, величины теплоты дыхания (для плодоовощной продукции) и, опять-таки, от способа укладки груза. Последний фактор обязательно оговаривается в Правилах перевозок [14].

Однако существует многочисленная группа СПГ, для перевозки которой в зимний период года точное поддержание температуры в грузовом помещении не требуется. Так для соков, пива, консервов, молочной продукции, минеральной воды и т. д., необходимо просто поддержание положительных температур в ГПИВ без ущерба для качества [15]. Эта категория грузов допускается к перевозкам в вагонах-термосах, хотя и с ограничением времени транспортировки. Допустимый срок зависит от времени года и расстояния перевозки, что регламентируются отдельными указаниями МПС и РЖД.

Цель работы

Разработать рекомендации по использованию современных технологий и систем термостабилизации ГПИВ

для повышения эффективности и надежности перевозок скоропортящихся грузов железнодорожным транспортом, а также провести анализ существующих практик и сформулировать возможности для их улучшения.

Задача исследования

Совершенствование логистических процессов и технологий при перевозке скоропортящихся грузов железнодорожным транспортом с использованием новых технических решений с новыми для этой сферы теплоаккумулирующими материалами. Это позволит существенно снизить риски потерь и улучшить качество перевозимых скоропортящихся грузов.

Для расширения функциональных возможностей и устранения этих недостатков ИВТ могут быть оборудованы автономной системой отопления с энергоснабжением от подвагонного генератора [16].

Для ОИВ необходимо сохранение тепла, аккумулярованное грузом, т. к. погрузка осуществляется со склада или другого транспортного средства, где ранее уже поддерживались требуемые для хранения этого груза положительные температуры и нужная относительная влажность. Поэтому, требования к укладке груза в ГПИВ заключаются в формировании максимально плотного штабеля, способствующего сохранению тепла, аккумуляруемого грузом [15]. Примеры температурных условий для СПГ даны в табл. 1.

Работа системы отопления ГПИВ сводится к компенсации теплопотерь, зависящих от температуры окружающего воздуха и от теплоизоляционных качеств ограждающих конструкций кузова вагона. Благодаря новой системе обогрева и отказу от воздуховода может быть увеличена высота ГПИВ без изменения наружных размеров кузова, что особенно актуально при перевозках СПГ с малым удельным весом.

Математическая модель процесса термообработки штабеля со скоропортящимся грузом

Рассмотрим переход к тепловому равновесию в системе «среда вагона — груз» при теплообмене между грузом и воздухом внутри ГПИВ. Схема размещения штабеля (без учета масштабов) показана на рис. 1.

В ОИВ с геометрическими параметрами полезного объема ГПИВ, равными a, b, c , помещается груз с геометрическими параметрами h_1, h_2, h_3 .

Считаем штабель с грузом — твердым телом. Между ним, стенками и полом ГПИВ конструктивно предусмотрены воздушные промежутки, создающие «кольцевую щель», обеспечивающую токи воздуха, способного перемещаться при естественной конвекции и омывать все наружные поверхности штабеля.

При включении электрических нагревателей мощностью по 1000 Вт каждый пол и вертикальные стенки ГПИВ являются теплоотдающими, а пол и стенки штабеля теплопоглощающими. В режиме охлаждения штабеля, при выключенных нагревателях их роли меняются.

В математической модели все это рассматривается как совокупность вертикальных и горизонтальных каналов, образованных пластинами, имеющими различную температуру. Самопроизвольное движение воздуха обусловлено естественной конвекцией, возникающей в вертикальных каналах, его движение под полом штабеля обусловлено наличием зоны сопряжения горизонтальных и вертикальных каналов [10, 17, 18]. Схематично, без соблюдения масштаба, движение токов воздуха показано на рис. 1

Технически возможный зазор между стенками грузового помещения и штабелем составляет 17–27–40 мм. На полу грузового помещения установлены транспортные поддоны, обеспечивающие воздушный зазор между полом и штабелем толщиной $h=100$ мм. Коэффициент теплопередачи k через зазоры между стенками каналов толщиной h определяется равенством:

$$k = \frac{1}{\frac{2}{\alpha} + \frac{h}{\lambda_g}}$$

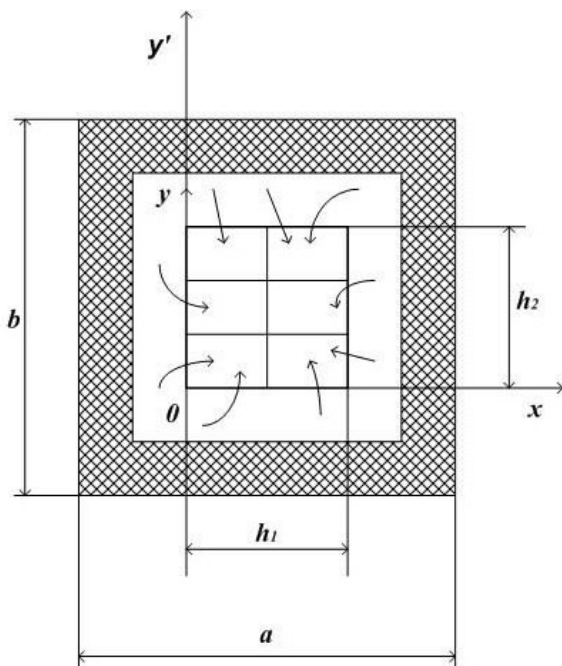


Рис. 1. Схема циркуляционных токов воздуха при его естественной конвекции в грузовом помещении вагона со штабелем СПГ [15]

Fig. 1. Air circulation currents under natural convection in the cargo compartment of LNG wagon [15]

здесь α — коэффициент конвективной теплоотдачи от стенок щели воздуху, Вт/(м²·°C); λ_g — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C). Обычно в расчетах принимают $k=0,4$ Вт/(м²·°C). Груз в начальный момент времени имеет температуру $t_0=7$ °C. Температура среды внутри вагона является величиной постоянной и принимает значение $t_g=2,5$ °C.

Построение модели, описывающей динамику распространения теплоты в штабеле груза, начнем с рассмотрения канонической задачи нагревания (охлаждения) бесконечной пластины, рассмотренной в курсах теплопередачи [19]. Пусть имеется бесконечная пластина толщиной 2δ , симметрично расположенная относительно оси ординат (рис. 1).

В начальный момент времени $\tau=0$ температура всех ее точек одинакова $t=t_0=const$. Это тело находится в воздухе ГПИВ, с постоянной температурой $t_g < t_0$ и охлаждается (или нагревается) в нем за счет естественной конвекции.

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·°C), с обеих поверхностей пластины считается постоянным $\alpha=const$ и одинаковым, чем обеспечивается симметрия тепловой задачи. Проводя отсчет температуры относительно температуры воздуха, вводим избыточную температуру данной точки пластины θ , °C:

$$\theta = t - t_g. \tag{1}$$

Известно [19], что в общем случае дифференциальное уравнение теплопроводности в теле, не имеющем источников теплоты, имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right). \tag{2}$$

Избыточная температура θ является функцией трех координат и времени $\theta=\theta(\tau, x, y, z)$. Здесь $a=const$ — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Он определяется эквивалентными коэффициентами: теплопроводности $\lambda_{эkv}$, Вт/(м·°C); удельной теплоемкости $C_{эkv}$, Дж/(кг·°C) и плотности ρ , кг/м³ штабеля с СПГ:

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}.$$

По умолчанию нижний индекс «эkv» опускается для сокращения записи.

В рассматриваемой геометрии задачи симметричного охлаждения пластины ее температура изменяется со временем τ только вдоль оси $0x$. При этом уравнение (2) существенно упрощается:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right); \quad \theta = \theta(\tau, x). \tag{3}$$

Уравнение (3) рассматривается при начальном условии:

$$\theta|_{\tau=0} = \theta_0 = t_0 - t_g. \tag{4}$$

Граничные условия задаются значениями тепловых потоков:

— на центральной оси пластины ($x=0$):

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \tag{5}$$

— на поверхности пластины

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \pm \frac{\alpha}{\lambda} \theta \Big|_{x=\delta}. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение (3) вместе с начальным условием (4) и двумя краевыми условиями (5) и (6) формируют каноническую задачу математической физики [20, 21], которая решается методом разделения переменных. Согласно этому методу функция двух переменных $\theta(\tau, x)$ рассматривается в виде произведения двух функций одной переменной, аргументом первой функции является время τ , а второй координата x :

$$\theta(\tau, x) = \varphi(\tau)\psi(x). \quad (7)$$

Подстановка (7) в (3) дает соотношение, связывающее между собой два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = a \frac{\psi''(x)}{\psi(x)}. \quad (8)$$

Здесь левая часть уравнения зависит от времени τ , правая от координаты x — независимых величин, имеющих различные размерности. Но для того, чтобы равенство (8) выполнялось при любых x и τ , то левая и правая его части должны порознь быть равны безразмерной постоянной.

Обозначив эту постоянную через $-k^2$, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, с общей постоянной:

$$\begin{cases} \frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} + ak^2 = 0; \\ \varphi(\tau) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} + k^2 = 0. \\ \psi(x) \end{cases} \quad (10)$$

Уравнениям (9) и (10) соответственно удовлетворяют функции:

$$\varphi(\tau) = C_1 e^{-ak^2\tau}; \quad (11)$$

$$\psi(x) = C_2 \sin kx + C_3 \cos kx. \quad (12)$$

Здесь C_1 , C_2 и C_3 — произвольные постоянные (постоянные интегрирования).

Подставляя (11) и (12) в выражение (7), получаем функцию, являющуюся общим решением уравнения (3) при любых значениях постоянных C_1 , C_2 , C_3 и k :

$$\theta(\tau, x) = \varphi(\tau)\psi(x) = C_1 e^{-ak^2\tau} [C_2 \sin kx + C_3 \cos kx]. \quad (13)$$

Функция будет решением рассматриваемой задачи, если она удовлетворяет граничным условиям (5), (6) и начальному условию (4). Для выполнения первого требования прежде получим частную производную по координате x , а затем положим $x=0$:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = C_1 e^{-ak^2\tau} k [C_2 \cos kx - C_3 \sin kx]_{x=0} = 0.$$

В этом равенстве только выражение в квадратных скобках может быть равно нулю при любых значениях постоянной C_3 :

$$[C_2 \cos kx - C_3 \sin kx]_{x=0} = 0.$$

Откуда следует, что: $C_2 = C_3 \sin 0 = 0$.

Первое частное решение дифференциального уравнения (13) будет:

$$\theta(\tau, x) = A e^{-ak^2\tau} \cos kx, \quad (14)$$

где $A = C_1 C_3$ — новое обозначение постоянной интегрирования. Очевидно, что $A \neq 0$, в противном случае мы бы имели тривиальное решение задачи.

Введем требование, что частная производная по переменной x функции (14) удовлетворяет краевому условию (6) при $x=\delta$:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -kA e^{-ak^2\tau} \sin k\delta = -\frac{\alpha}{\lambda} A e^{-ak^2\tau} \cos k\delta.$$

После сокращений получаем:

$$\operatorname{ctg}(k\delta) = \frac{k\lambda}{\alpha}. \quad (15)$$

Умножаем и делим правую часть равенства на δ . Аргумент котангенса называют «характеристическим числом»:

$$\mu = k\delta.$$

С его использованием правая часть равенства (15) будет величиной, обратной введенному ниже (26) безразмерному критерию Био Bi [18, 19]:

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}.$$

При этом равенство (15) запишется так:

$$\operatorname{ctg}\mu = \frac{\mu}{Bi}.$$

Это трансцендентное уравнение имеет бесчисленное множество решений μ_n ($n=1, 2, 3, \dots$), которые получают как точки пересечения ветвей котангенсоиды $y = \operatorname{ctg}\mu$

прямой линией $y = \frac{1}{Bi}\mu$, с положительным угловым ко-

эффициентом, $\frac{1}{Bi} > 0$ при котором $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_n \dots$

Каждому из чисел μ_n отвечает «собственное значение» функции $\theta_n(\tau, x)$, являющееся частным решением уравнения теплопроводности (3):

$$\theta_n(\tau, x) = A_n e^{-\frac{\mu_n^2 a\tau}{\delta^2}} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right), \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

Общее решение этого уравнения выражается функциональным рядом Фурье, представленным «разложением по косинусам» [20, 21]:

$$\theta(\tau, x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\frac{\mu_n^2 a\tau}{\delta^2}} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right). \quad (17)$$

Известно, что если отдельные функции (16) удовлетворяют граничным условиям (5) и (6), то и их сумма (17) тоже удовлетворяет этим условиям и ряд (17) будет общим решением дифференциального уравнения (3) [20]:

Коэффициенты разложения A_n в ряде (17) определяются из начального условия (4). Подставив в (17) $\tau=0$ и используя условия (4), получаем:

$$\theta(0, x) = \theta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right). \quad (18)$$

В теории рядов Фурье показано [20, 21], что для последовательности чисел μ_n выполняется свойство ортогональности на симметричном отрезке $(-\delta; +\delta)$:

$$\int_{-\delta}^{+\delta} \cos\frac{\mu_n x}{\delta} \cdot \cos\frac{\mu_m x}{\delta} dx = \begin{cases} = 0 & \text{при } n \neq m \\ \neq 0 & \text{при } n = m \end{cases}. \quad (19)$$

С его помощью определяются все коэффициенты A_n уравнения (18). Для этого нужно умножить обе части равенства (18) на $\cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right) dx$ и интегрировать полученное выражение в пределах $(-\delta; +\delta)$. При использовании свойства (19) приходим к выражению:

$$\theta_0 \int_{-\delta}^{+\delta} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right) dx = A_n \int_{-\delta}^{+\delta} \cos^2\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right) dx.$$

Выполняем интегрирование в правой и левой частях равенства:

$$\theta_0 \frac{2\delta \sin \mu_n}{\mu_n} = A_n \delta \left(1 + \frac{\sin 2\mu_n}{2\mu_n}\right).$$

Откуда:

$$A_n = \theta_0 \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (17), получим ряд, описывающий распределение температур в симметрично охлаждаемой пластине толщиной 2δ :

$$\frac{\theta(\tau, x)}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \cos\left(\frac{\mu_n x}{\delta}\right). \quad (21)$$

Для обеспечения большей общности всем полученным ниже результатам вводим следующие безразмерные критерии и числа подобия [17]–[19]:

— параметр температуры (безразмерная температура, записанная при использовании координаты x):

$$\Theta_x = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = \frac{t(x, \tau) - t_g}{t_0 - t_g};$$

— аналогичные «безразмерные» координаты:

$$X = \frac{x}{\delta}; \quad \Psi = \frac{y}{\delta};$$

— число Фурье (Fo), называемое «безразмерным временем»:

$$Fo = \frac{a\tau}{h^2}; \quad (22)$$

— критерий Прандтля (Pr), являющийся собственной характеристикой теплоносителя: $Pr_g = \frac{\nu_g}{a_g}$. Для воз-

духа в ГПИВ $Pr_g = 0,706 = \text{const}$;

— число Грасгофа (Gr), характеризующее подъемную силу нагретого воздуха при возбуждении естественной конвекции: $Gr = g\beta_g \frac{\Delta t \cdot h^3}{\nu_g^2}$; (23)

— число Нуссельта (Nu), являющееся безразмерным коэффициентом теплоотдачи воздуху, поднимающемуся в щели между штабелем груза и стенками ГПИВ при включении средств электроподогрева:

$$Nu_g = \frac{\alpha h}{\lambda_g}; \quad (24)$$

— число Релея (Ra) — критерий, применяемый при описании естественной конвекции в ограниченном пространстве:

$$Ra = Gr \cdot Pr = g\beta\Delta t \frac{h^3}{\nu_g a_g}; \quad (25)$$

— критерий Био (Bi) являющийся отношением термического сопротивления теплопроводности (h/λ) к термическому сопротивлению теплоотдачи ($1/\alpha$) на поверхности раздела твердого тела и обтекающего его теплоносителя (в данном случае штабеля с СПГ и воздуха в ГПИВ):

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda_{ct}}; \quad (26)$$

В этих соотношениях фигурируют: $g=9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; физические характеристики воздуха: $\beta_g=1/273 [1/^\circ\text{C}]$ — коэффициент объемного теплового расширения и ν_g — кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; λ_{ct} и λ_g — коэффициенты теплопроводности стенки канала и воздуха соответственно, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; h — характерный размер области, где происходит тепловой процесс, м .

Тогда равенство (21) выражается в безразмерной форме:

$$\Theta_x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo} \cos(\mu_n X). \quad (27)$$

Упрощенная модель обогреваемого ГПИВ включает две взаимно перпендикулярных пластины, расположенные вдоль координатных осей Ox и Oy и образующие при пересечении «неограниченный брусок». Для него уравнение теплопроводности запишется в таком виде:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right); \quad \Theta = \Theta(\tau, x, y). \quad (28)$$

Решением уравнения (28) будет произведение двух функций типа (21):

$$\frac{\Theta(\tau, x, y)}{\theta_0} = \frac{\theta(\tau, x)}{\theta_0} \cdot \frac{\theta(\tau, y)}{\theta_0} = \Theta_x \Theta_y.$$

Подстановка равенства (27) и аналогичного ему, дает двойной ряд:

$$\Theta_x \Theta_y = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo_x} \cos(\mu_n X) \right] \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_m}{\mu_m + \sin \mu_m \cos \mu_m} e^{-\mu_m^2 Fo_y} \cos(\mu_m Y) \right].$$

Здесь Fo_x, Fo_y — числа Фурье (22), в которых за определяющие размеры h взяты толщины слоя тепловой изоляции на стенах ГПИВ и на полу соответственно h_x и h_y , соответственно; X и Y — безразмерные координаты

Более точной моделью ГПИВ является параллелепипед, получаемый пересечением уже трех взаимно перпендикулярных пластин. Его охлаждение (или нагревание) описывается уравнением вида:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right); \quad \Theta = \Theta(\tau, x, y, z).$$

Решением этого уравнения будет произведение трех температурных функций типа (21), записанных для координат x , y и z , соответственно. Тогда вместо равенства (25) надо использовать следующее:

$$\frac{\Theta(\tau, x, y, z)}{\Theta_0} = \frac{\Theta(\tau, x)}{\Theta_0} \cdot \frac{\Theta(\tau, y)}{\Theta_0} \cdot \frac{\Theta(\tau, z)}{\Theta_0} = \Theta_x \Theta_y \Theta_z.$$

Штабель с СПГ обычно готовят в виде параллелепипеда с различными, но близкими размерами: $h_1=2,5$ м; $h_2=2,4$ м; $h_3=2,2$ м. В расчетах теплопередачи с погрешностью, не превышающей 5%, его можно представить одномерной сферической моделью диаметром $d \approx \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3} = \sqrt[3]{13,2} = 2,36$ м и для расчета тепловых потоков выделять в ней шаровые стенки [10, 18] с площадями:

$$F_{\text{вн}} = \pi d_1^2; \quad F_{\text{нар}} = \pi d_2^2; \quad F_{\text{ср}} = \sqrt{F_{\text{вн}} F_{\text{нар}}}.$$

Методы расчета расхода теплоты при нагревании (охлаждении) штабеля в ГПИВ за конечный отрезок времени Δt основаны на использовании уравнения теплового баланса для малого элемента объема dV воспринимающего за время dt количество теплоты $dQ = C_p(t_2 - t_1)dV$.

Общее количество теплоты, поглощаемой штабелем за время Δt , получается интегрированием этого выражения по всему объему ГПИВ:

$$\Delta Q = C_p \int_V (t_2 - t_1) dV = C_p V (\bar{t}_2 - \bar{t}_1).$$

Средняя (по всему объему ГПВ) температура определяется равенством:

$$\bar{t} = \frac{1}{V} \int_V t dV.$$

Таким образом, основная задача по расчету температурного режима в ГПИВ сводится к определению функции $\bar{t}(\delta)$.

Теплоотдача от штабеля осуществляется естественной конвекцией, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , строго говоря, различным на различных поверхностях штабеля, но для которого можно ввести среднюю величину. При этом:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \alpha S \int_{\tau_1}^{\tau_2} [t_g - t_n(\tau)] d\tau.$$

Пример теплового расчета

Выполним оценки теплового режима при нагревании штабеля со скоропортящимся грузом в ГПИВ. Для конкретности примем, что штабель образуют банки с фруктовым соком в картонной упаковке (по 4 банки в одной коробке). Весовое содержание основных составляющих штабеля дано в табл. 2.

При включенных нагревательных элементах, обеспечивающих среднюю температуру стенки $t_c=10$ °C

(в соответствии со значением, отмеченном в табл. 1) можно принять, что разность температур между верхней и нижней точками составляет $\Delta t=10$ °C. Тогда за характерный размер области, где происходит тепловой процесс можно взять половину высоты вертикальной стенки ГПИВ: $h=1,2$ м. При этом из равенства (23) получаем значение числа Грасгофа: $Gr=6,64 \cdot 10^{10}$.

Для воздуха критерий Прандтля (22) остается практически постоянным в очень широком интервале температур: $Pr_g=0,706$ (см. табл. 1). В данном случае мы получаем значение числа Рейля (25): $Ra \approx 2,3 \cdot 10^9$, что позволяет использовать равенство (п. 1) из табл. 2 для вычисления среднего значения числа Нуссельта (24). Оно оказывается равным $Nu \approx 167,2$.

Отсюда получаем коэффициент теплоотдачи от обогреваемой вертикальной стенки ГПИВ:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_g}{h} = 167,2 \frac{2,6 \cdot 10^{-2}}{2,4} = 1,81 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Тепловой поток от нагретого пола ГПИВ оценивается следующим образом.

Если пол ГПИВ с гофрами рассматривать как горизонтальную нагреваемую пластину, расположенную ниже холодной пластины (пол штабеля) то после того, как число Рейля (25) достигнет значения $Ra \approx 1500$, в слое воздуха между пластинами возникает свободная конвекция. Прослойка воздуха приобретает ячеистую структуру — внутри ячеек воздух поднимается вверх, а по их периферии — вниз. При числах Рейля $Ra < 1500$ движение воздуха под полом штабеля отсутствует, и теплота передается теплопроводностью, а при $Ra > 4700$ режим движения воздуха между горизонтальными пластинами становится турбулентным.

Для горизонтальных воздушных прослоек известны расчетные формулы для определения коэффициента теплоотдачи α , определяемого из числа Нуссельта (24), выражаемого через критерий Грасгофа (23):

$$Nu = 0,195 Gr^{0,25} \quad \text{при } 10^4 < Gr < 4 \cdot 10^5; \quad (29)$$

$$Nu = 0,068 Gr^{2/3} \quad \text{при } Gr > 4 \cdot 10^5. \quad (30)$$

В рассматриваемом случае за характерный размер h в равенстве (25) выбрано расстояние между пластинами, (высота гофры $h=0,05$ м плюс толщина поддона). Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности горизонтальных пластин $\bar{\alpha}_{\text{гор}}$ приближенно рассчитывается по формулам для вертикальных пластин, отмеченных в табл. 2, с поправками [19]:

— для теплоотдающей поверхности, обращенной вверх (пол ГПИВ):

$$\bar{\alpha}_{\text{гор}} = 1,3 \bar{\alpha}_{\text{расч}}; \quad (31)$$

— для теплопринимающей поверхности штабеля, обращенной вниз:

$$\bar{\alpha}_{\text{гор}} = 0,7 \bar{\alpha}_{\text{расч}}. \quad (32)$$

Расхождение в значениях коэффициента теплоотдачи, получаемых по формулам (29), (30) и в табл. 2 с формулами (31), (32), не превосходит 10%.

Таблица 2

Эквивалентные физические характеристики штабеля с грузом, и критериальные равенства, описывающие теплообмен при естественной конвекции воздуха внутри грузового помещения вагона

Table 2

Equivalent physical characteristics of the stack with cargo, and criterion equations describing heat exchange under natural convection of air inside the cargo compartment of the wagon

Содержимое штабеля	Эквивалентные физические характеристики СПГ	Критериальные равенства для конвективного теплообмена внутри ГПИВ
Фруктовый сок, 78,6%	Плотность: $\rho = 1176,6 \text{ кг/м}^3$ Коэффициент теплопроводности: $\lambda = 0,558 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ Удельная теплоемкость: $C = 3,44 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$	Вертикальные стены ГПИВ: $\overline{Nu} = 0,76(Ra)^{0,25}$ для $10^3 < Ra < 10^9$ (п. 1)
Стеклянная тара, 19,6%		Обогреваемый пол ГПИВ: $Nu = 0,195Gr^{0,25}$ при $10^4 < Gr < 4 \cdot 10^5$ $\overline{Nu} = 0,068Gr^{2/3}$ при $Gr > 4 \cdot 10^5$ (п. 2)

Вычисляя, в соответствии с равенством (23), число Грасгофа при характерном размере области $h = 0,05$ м получаем $Gr \approx 4,36 \cdot 10^4$.

Это значение позволяет рассчитать по формуле (п. 2) из табл. 2 среднее по поверхности пола число Нуссельта: $Nu \approx 1,44$.

Тогда в соответствии с (24) можно вычислить коэффициент теплоотдачи в ГПИВ от нагреваемого пола:

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \lambda_g}{h} \approx 0,72 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Возможен и другой подход — М. А. Михеев [10] предложил рассчитывать удельный тепловой поток через вертикальные и горизонтальные щели по формуле «эквивалентной теплопроводности»:

$$q = \frac{\varepsilon_k \lambda_g}{h} (t_{c,1} - t_{c,2}),$$

где $t_{c,1}$ и $t_{c,2}$ — температуры поверхностей, разделенных прослойкой, °C; ε_k — безразмерный коэффициент конвекции — величина, зависящая от интенсивности свободной конвекции, и может быть представлена следующим критериальным равенством:

$$\varepsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}.$$

Формула справедлива при $Ra > 10^3$ и ее можно использовать при турбулентном движении воздуха под дном штабеля.

В рассматриваемом случае $Ra = 1,56 \cdot 10^3$, поэтому согласно полученному равенству $\varepsilon_k \approx 3,57$, т. е. конвекция усиливает теплоперенос через горизонтальные и вертикальные прослойки воздуха в ГПИВ почти в 4 раза.

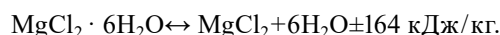
Легко получить, связь между коэффициентом теплоотдачи α и коэффициентом конвекции:

$$\alpha = \varepsilon_k \frac{\lambda_g}{h} = \frac{3,57 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{0,05} = 1,785 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Как видим, результаты расчета коэффициентов теплоотдачи, полученные в соответствии с различными методиками, оказались близкими.

Отдельно стоит задача о максимально продолжительно поддержании температурного режима в ГПВ без дополнительного энергообеспечения (условия неподвижного вагона). Она решается установкой тепловых аккумуляторов под полом ГПВ [22]. Тепловые аккумуляторы — это герметичные сосуды, имеющие внутри себя электронагревательные элементы и заполненные теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) с высокой эквивалентной теплоемкостью.

В качестве ТАМ, могут использоваться твердые парафины, технические воски и кристаллогидраты солей, представленные в табл. 3. При подведении теплоты эти ТАМ плавятся при постоянной температуре, а при охлаждении они затвердевают, возвращая скрытую теплоту плавления [7, 11, 23, 24]. Примером такой обратимой реакции является реакция разложения кристаллогидрата хлористого магния при его нагревании и его образования при охлаждении (эти реакции часто тоже называют «плавлением» и «затвердеванием»):



Физические свойства ТАМ на основе некоторых из названных соединений представлены в табл. 3.

Главные их преимущества связаны с эксплуатационными свойствами: дешевизной, химической инертностью, многократностью цикла плавление — затвердевание [4, 9].

Особняком стоит смесь кристаллогидратов, солей и глицерина, имеющая название «солевая смесь Локка». Ее основой является кристаллогидрат уксуснокислого натрия и гипосульфит натрия. Реакции их разложения (плавления) имеют соответственно вид:



$$t_{\text{пл}} = 48 \text{ °C};$$



$$t_{\text{пл}} = 59 \text{ °C}.$$

Таблица 3

Физико-химические свойства ТАМ [5, 7, 11, 22, 25]

Table 3

Physico-chemical properties of heat-accumulating material [5, 7, 11, 22, 25]

Теплоаккумулирующий материал	Температура плавления, $t_{пл}$, °С	Теплота плавления, R , Дж/кг	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·°С)	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)
Полиэтилен высокого давления	125	260	925 (тв.)	2,5	0,25
Стеариновая кислота	70	203	—	—	0,172
Парафин орского НПЗ	59	225	851	1,08 (тв.)	0,268
Технический воск	73–87	147	678	1,04 (тв.)	0,254
Буроугольный воск	74–89	139	998–1000	1,04	0,272
Канделильский воск	60–68	175,2	950–990	1,06	—
Ва (ОН) ₂ ·8H ₂ O	78	267	2180	1,46	—
КAl (SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	92	254	1750	1,50	—

Дополнительно солевая смесь Локка содержит хлористый кальций 2,2% и глицерин 1%. Солевая смесь Локка имеет огромную теплоту плавления $Q=3120$ кДж/кг, происходящего при температуре $t_{пл}=59$ °С.

Солевая смесь Локка химически практически инертна, не токсична и имеет низкую себестоимость. Она весьма перспективна для тепловых аккумуляторов, входящих в конструкцию «теплый пол» ГПИВ.

Выводы

Предложена математическая модель, для расчета тепловых режимов в штабеле скоропортящихся грузов при продолжительных железнодорожных перевозках в изотермическом вагоне с подогревом грузового помещения вагона. Продукция требует сохранения сравнительно узкого интервала положительных температур, не допуская ни переохлаждения, ни перегрева в условиях как летней жары (до 40 °С), так и сильного мороза (до –40 °С).

Сохранение температурного режима продукции обеспечивается во всем объеме штабеля перевозимого

груза за счет его собственной теплоемкости и коррекции температурного режима. Эта коррекция обеспечивается системами обогрева, размещаемыми в стенах и «теплым полом» грузового помещения вагона, создающими естественную конвекцию воздуха, обтекающего штабель, а также за счет использования теплоаккумулирующих материалов.

Теплоаккумулирующие материалы обладают большой эквивалентной теплоемкостью, обусловленной обратимыми фазовыми превращениями «плавление-затвердевание» при заданных температурах.

Методология совмещения естественной конвекции теплого воздуха и теплоаккумулирующих систем, возбуждающих эту конвекцию применима для расчетов технических параметров систем обогрева не только отапливаемых изотермических транспортных средств, но и для складских помещений временного хранения плодовоовощной продукции непосредственно у ее производителя, в условиях внезапного похолодания или резкого повышения температуры воздуха за счет солнечной радиации.

Литература

1. Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» // Гарант. Ру. [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/>
2. Бартош Е. Т. Энергетика изотермического подвижного состава. М.: Транспорт, 1976. 303 с.
3. Науменко С. Н. Обеспечение экологичности и эффективности изотермических транспортных средств. М.: Интекст, 2010. 159 с.
4. Архаров И. А., Махотин И. Д. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов ЦОД и банков данных. Часть 2. Экономическая эффективность систем жидкостного и воздушного охлаждения. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 21–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28.
5. Александров В. Д. Теплоаккумулирующие материалы на основе кристаллогидратов/В. Д. Александров, О. В. Соболев, С. А. Фролова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2009. № 1 (75). С. 100–106.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation dated January 21, 2020 No. 20 «On approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation». Garant. Ru. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/> (in Russian)
2. Bartosh E. T. Power engineering of isothermal rolling stock. Moscow: Transport, 1976. 303 p. (in Russian)
3. Naumenko S. N. Ensuring the environmental friendliness and efficiency of insulated vehicles. Moscow: Intext, 2010. 159 p. (in Russian)
4. Arkharov I. A., Makhotin I. D. A comparative analysis of ways to cool data center servers and data banks. Part 2. Cost-effectiveness of liquid and air-cooled systems. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28. (in Russian)
5. Alexandrov V. D. Heat accumulating materials based on crystallohydrates/V. D. Alexandrov, O. V. Sobol, S. A. Frolova. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2009. No. 1 (75). pp. 100–106. (in Russian)

6. Ворон О. А. Применение тепловых аккумуляторов при перевозках скоропортящихся грузов в изотермическом вагоне/О. А. Ворон, В. И. Моисеев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_3_8.
7. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии/Г. Бекман, П. Гилли. Перевод с англ. В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова. Под. ред. В. М. Бродянского. М.: Мир, 1987. 271 с.
8. Дугин Г. С. Реформирование специализированных перевозок скоропортящихся грузов в рефрижераторном подвижном составе (опыт Китая). // Бюллетень транспортной информации. 2009. № 2 (164). С. 22–26.
9. Rodrigue J. P., Notteboom T. The Cold Chain and its Logistics. // The Geography of Transport Systems. New York: Routledge, 2020. 456 p.
10. Быков Л. В., Молчанов А. М., Янышев Д. С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики: учебное пособие/Быков Л. В., Молчанов А. М., Янышев Д. С. М.: Ленанд, 2021. 194 с.
11. Амер А. Э., Лебедев В. А. Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 3. С. 570–581. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-570-581>.
12. Набатчикова Т. И. О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов/Т. И. Набатчикова, С. Н. Науменко, Г. Б. Гусев // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 88–92. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92.
13. Бартош Е. Т., Кокковихин А. В. Теоретические основы процесса воздухообмена в рефрижераторных вагонах // Труды ВНИИЖТ, 1983. № 647. С. 99–106.
14. Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов: утв. приказом Минтранса России от 4 марта 2019 г. № 66. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_326540/ (дата обращения: 09.11.2022).
15. Voron O., Moiseev V. Thermal processes in the stack of perishable cargo transported in the heated isothermal car. // Journal of Physics Conference Series. December 2021: 2131 (2):022044. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022044
16. Патент № 2621834 Российская Федерация, МПК В60Р 3/00 (2006.01). Отапливаемое транспортное средство (преимущественно вагон): № 2015149202, заявлено 16.11.2015, опубликовано 07.06.2017/О. А. Ворон, А. В. Селезнев, А. В. Соломин. 9 с.
17. Тепломассообмен: учебное пособие/Дерюгин В. В., Васильев В. Ф., Уляшева В. М. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 238 с.
18. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для вузов/Петров А. И. СПб.: Лань, 2022. 424 с.
19. Бухмиров В. В. Тепломассообмен: учебное пособие. Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. Иваново, 2014. 360 с.
20. Шипачев В. С. Высшая математика: учебник для вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2025. 447 с.
21. Бугров Я. С. Высшая математика в 3 т. Т. 1. Дифференциальное и интегральное исчисление в 2 кн. Книга 2: учебник для вузов/Я. С. Бугров, С. М. Никольский. 7-е изд., стер. М.: Издательство Юрайт, 2025. 246 с.
6. Voron O. A. The use of thermal accumulators in the transportation of perishable goods in an insulated wagon/O. A. Voron, V. I. Moiseev. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications*. 2024. № 3. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_3_8. (in Russian)
7. Beckman G. Thermal energy storage/G. Beckman, P. Gilly. Translated from English by V. Ya. Sidorov, E. V. Sidorov. Ed. V. M. Brodyansky. Moscow: Mir Publ., 1987. 271 p. (in Russian)
8. Dugin G. S. Reforming specialized transportation of perishable goods in refrigerated rolling stock (Chinese experience). *Bulletin of transport information*. 2009. No. 2 (164). pp. 22–26. (in Russian)
9. Rodrigue J. P., Notteboom T. The Cold Chain and its Logistics. *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge, 2020. 456 p.
10. Bykov L. V., Molchanov A. M., Yanyshv D. S. Fundamentals of computational heat transfer and hydrodynamics: a textbook/Bykov L. V., Molchanov A. M., Yanyshv D. S. M.: Lenand, 2021. 194 p. (in Russian)
11. Amer A. E., Lebedev V. A. The influence of thermal cycling on the choice of a working fluid with a phase transition for heat accumulators of solar heat supply systems. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2020. Vol. 24. No. 3. pp. 570–581. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-570-581>. (in Russian)
12. Nabatchikova T. I. On the influence of external factors on the heat transfer coefficient of the body of a specialized vehicle for the transportation of perishable goods/T. I. Nabatchikova, S. N. Naumenko, G. B. Gusev. *Bulletin of VNIIZHT*. 2020. Vol. 79. No. 2. pp. 88–92. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92. (in Russian)
13. Bartosh E. T., Kokovikhin A. V. Theoretical foundations of the air distribution process in refrigerated wagons. *Proceedings of VNIIZHT*, 1983. no 647. pp. 99–106. (in Russian)
14. Rules of transportation of perishable goods by rail: approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated March 4, 2019 No. 66. [Electronic resource]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_326540/ (date of request: 11/09/2022). (in Russian)
15. Voron O., Moiseev V. Thermal processes in the stack of perishable cargo transported in the heated isothermal car. *Journal of Physics Conference Series*. December 2021: 2131 (2):022044. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022044.
16. Patent No. 2621834 Russian Federation, IPC B60R 3/00 (2006.01). Heated vehicle (mainly a wagon); No. 2015149202, announced on 16.11.2015, published on 07.06.2017/O. A. Voron, A. V. Seleznev, A. V. Solomin. 9 p. (in Russian)
17. Heat and mass transfer: a textbook/Deryugin V. V., Vasiliev V. F., Ulyasheva V. M. 3rd ed., St. Petersburg: Lan, 2020. 238 p. (in Russian)
18. Technical thermodynamics and heat transfer: a textbook for universities/Petrov A. I. St. Petersburg: Lan, 2022. 424 p. (in Russian)
19. Bukhmirov V. V. Heat and mass transfer: a textbook. Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin. Ivanovo, 2014. 360 p. (in Russian)
20. Shipachev V. S. Higher mathematics: a textbook for universities. 8th ed., revised and additional M.: Yurayt Publishing House, 2025. 447 p. (in Russian)
21. Bugrov Ya. S. Higher mathematics in 3 volumes Vol. 1. Differential and integral calculus in 2 books. Book 2: textbook for

22. Старовойтов С. В. Теплоаккумуляторы / С. В. Старовойтов, Д. В. Союстов, Д. И. Босько // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 06–07 октября 2020 г. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. с. 104–107.
23. Моисеев В. И., Жебанов А. В. Проблемы транспортирования вязких и застывающих грузов в условиях низких температур. Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2022. 147 с.
24. Моисеев В. И. Транспортировка летних видов дизельных топлив вагонами-цистернами при отрицательных температурах / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 4 (76). С. 90–94.
25. Аминов Р. З., Гариевский М. В., Аношин Д. М. Разработка конструктивных решений аккумулятора фазового перехода в условиях его функционирования в едином энергокомплексе с АЭС. // Теплоэнергетика. 2024. № 3. с. 18–31. DOI: 10.56304/S0040363624030019
22. Starovoitov S. V. Heat accumulators / S. V. Starovoitov, D. V. Soyustov, D. I. Bosko. *Energy of transport*. Rostov-on-Don, Rostov-on-Don, October 06–07, 2020. Actual problems and tasks: collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Communications, 2020. pp. 104–107. (in Russian)
23. Moiseev V. I., Zhebanov A. V. Problems of transportation of viscous and solidifying cargoes at low temperatures. Samara: Samara State University of Railway Transport, 2022. 147 p. (in Russian)
24. Moiseev V. I. Transportation of summer types of diesel fuels by tank wagons at subzero temperatures / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2019. No. 4 (76). pp. 90–94. (in Russian)
25. Aminov R. Z., Garievsky M. V., Anoshin D. M. Development of constructive solutions for a phase transition accumulator in conditions of its operation in a single power complex with a nuclear power plant. *Thermal power engineering*. 2024. No. 3. pp. 18–31. DOI: 10.56304/S0040363624030019. (in Russian)

Сведения об авторах

Моисеев Владимир Иванович

Д. т. н., доцент, кафедра «Высшая математика», Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра 1, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, moiseev_v_i@list.ru

Ворон Олег Андреевич

Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового полка Народного Ополчения, 2, rgups_voron@mail.ru

Сколов Андрей Викторович

Исполнительный директор ООО «Лекма Холод», 344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Доватора, 158/6, skolov@lekmaholod.ru

Старовойтов Сергей Вадимович

К. т. н., доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, se.starovoytov@yandex.ru

Information about authors

Moiseev Vladimir I.

D. Sc., Associate professor, Department «Higher Mathematics», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Russia, 190031, St. Petersburg, Moscow st., 9, moiseev_v_i@list.ru

Voron Oleg A.

D. Sc., Associate professor, Head of Department «Car and Car Facilities», Rostov State Transport University, Russia, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2, rgups_voron@mail.ru

Skolov Andrey V.

Executive Director of Lekma Kholod LLC, Russia, 344000, Rostov-on-Don, Dovatora st, 158/6, skolov@lekmaholod.ru

Starovoytov Sergey V.

Ph. D., Associate Professor of the Department «Heat and Power Engineering in Railway Transport», Rostov State Transport University, Postal address: Russia, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2, se.starovoytov@yandex.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»