

УДК 656.2 + 621.59:51-72

Определение температурных полей различных грузов при перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием холода сжиженного природного газа

И. Г. Киселев, В. В. Галов, М. Ю. Кудрин, Д. Я. Монастырский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Киселев И. Г., Галов В. В., Кудрин М. Ю., Монастырский Д. Я. Определение температурных полей различных грузов при перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием холода сжиженного природного газа // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 938–946. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-938-946

Аннотация

Цель: Разработать методику оценки теплового состояния грузов при помощи определения температурных полей различных грузов с регламентированным температурным режимом при их перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием сжиженного природного газа (СПГ) и экспериментальное подтверждение модели. Определить способ расчета массового расхода СПГ, необходимого для поддержания температурного равновесия в контейнере. **Методы:** Определение температурного состояния рассматриваемых грузов сведено к решению задачи теплопроводности в двумерной расчетной области с граничными условиями третьего рода и получению соответствующих температурных полей. Способ расчета расхода СПГ для поддержания температурного равновесия разработан на основе метода теплового баланса. **Результаты:** Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель, описывающая теплообмен различных грузов при транспортировке в автономном рефрижераторном контейнере с использованием холода СПГ. Сформулирована методика для расчета расхода СПГ для компенсации избыточных теплопритоков, проведен расчет, и получены температурные поля для сценария с перевозкой плодоовощей. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации условий транспортировки грузов при помощи хладотранспорта и разработки новых систем охлаждения рефрижераторных контейнеров с использованием СПГ в качестве дополнительного источника холода.

Ключевые слова: Автономные рефрижераторные контейнеры, охлаждение, рефрижераторные перевозки, сжиженный природный газ, температурные поля.

Введение

Из-за расширения географии контейнерных перевозок, усложнения логистики и маршрутов перевозок применение систем рефрижераторных систем необходимо для транспортировки все большего числа грузов. В 2024 г. объем перевозок контейнеров по сети РЖД составил 7,9 млн ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент), что на 6 % выше показателя 2023 г. и на 36 % выше показателя 2020-го [1]. По прогнозам экспертов Института

экономики и развития транспорта, к концу 2025 г. объемы могут достигнуть 8 млн ДФЭ [2]. При организации перевозок в рефрижераторных контейнерах для повышения сохранности и товарного вида продукции кроме ее охлаждения важно длительное время поддерживать стабильность температурного режима. При транспортировке грузов с регламентированным температурным режимом, особенно фармацевтических препаратов и плодоовощной продукции, соблюдение

Данные для расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Площадь ограждения	A	136,0	м ²
Коэффициент теплопередачи ограждения	k	0,60	Вт/(м ² · К)
Масса помидоров	$g_{гр}$	24 300	кг
Удельная теплоемкость красных помидоров	$c_{гр}$	3895,4	Дж/(кг · К)
Теплопроводность помидоров	λ	0,604	Вт/(м · К)
Холодопроизводительность рефрижераторного контейнера	$Q_{хол}^{\Phi}$	4200	Вт

температурных параметров является критически важным. Обеспечение требуемых температурных условий включает в себя создание и поддержание необходимого температурного режима [3].

Эта проблема отражена в «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. В документе особое внимание уделяется повышению скорости, качества и удобства грузовых отправок благодаря широкому внедрению современных технологий, развитию программы «грузовых деревень» и скоростных контейнерных маршрутов.

В условиях тренда к переходу грузоперевозок на унифицированные рефрижераторные контейнеры [5], а также растущего спроса на автономность транспортных единиц актуальным становится вопрос о разработке новых технических систем обеспечения безопасности термочувствительной продукции. Также следует учитывать и растущие предпочтения потребителей в пользу передовых технологий, таких как применение криогенных жидкостей в качестве топлива и вторичного хладагента. В области контейнерных грузоперевозок такой жидкостью может быть сжиженный природный газ (СПГ) [6, 7]. Однако в открытом доступе практически отсутствуют исследования, определяющие степень влияния СПГ на сохранность грузов.

В работе предлагается методика расчета теплового состояния с получением температурных полей грузов сферической формы в виде решения задачи нестационарной теплопроводности в декартовых координатах, по результатам которой можно дать оценку влияния СПГ на сохранность при перевозке наиболее распространенной плодоовощной продукции.

Для расчета принят автономный 40-футовый рефрижераторный контейнер, заполненный плодоовощами (красными помидорами). Теплофизические характеристики помидоров приняты в соответствии с данными ASHRAE [8]. Расчетные данные приведены в таблице.

Постановка задачи

Автономный рефрижераторный контейнер — универсальный контейнер, оборудованный рефрижераторной установкой и независимым источником питания. Установка контейнера производится на фитинговые платформы, предназначенные для перевозки 40- и 20-футовых контейнеров. В целях ускорения погрузочно-разгрузочных работ перевозимый в контейнерах груз размещается на стандартных паллетах. Расстановка паллет предусматривается с организацией пространства для свободной циркуляции воздуха. Схема типового автономного рефрижераторного контейнера, место размещения рефрижераторной установки и внешнего источника питания приведены на рис. 1.

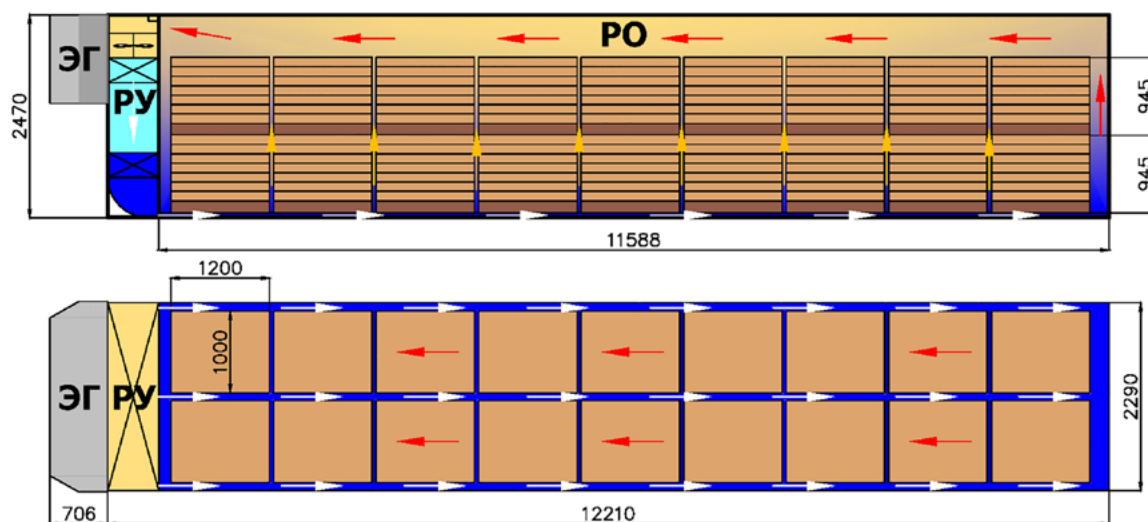


Рис. 1. Схема автономного 40-футового рефрижераторного контейнера:

ЭГ — независимый источник питания, РУ — встроенная рефрижераторная установка, РО — рабочий объем контейнера. Направление течения воздуха в рабочем объеме обозначено стрелками

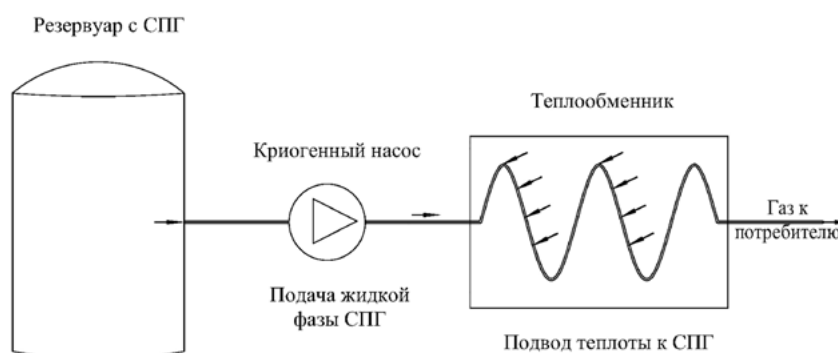


Рис. 2. Схема утилизации холода при регазификации СПГ

Замена дизельного топлива на СПГ открывает возможность полезного использования холода от регазификации (рис. 2). Рекуперация холода осуществляется в теплообменнике змеевикового типа из нержавеющей стали, который устанавливается в грузовом отсеке рефрижераторного контейнера. Данный теплообменник выполняет функцию дополнительного источника холода, снижая нагрузку на компрессор основной установки и обеспечивая компенсацию теплопритоков в аварийных ситуациях.

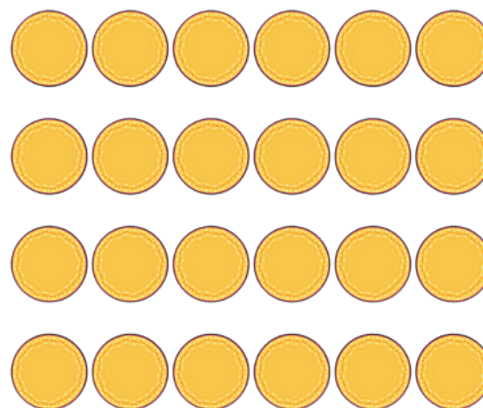
Для перевозки плодоовощей и фруктов используется перфорированная пластиковая и картонная

тара. В случае перевозки при помощи контейнера упаковки объединяются и устанавливаются на паллетах ярусами. Пример упаковки из гофрированного картона и методика укладки красных помидоров представлены на рис. 3.

Распределение температур грузов, перевозимых в рефрижераторных контейнерах, может быть рассмотрено в параметрических и канонических областях декартовой, цилиндрической или сферической системы координат. В большинстве случаев грузы будут представлять собой твердые тела конечных размеров: параллелепипеды, цилиндры и сферы.



а

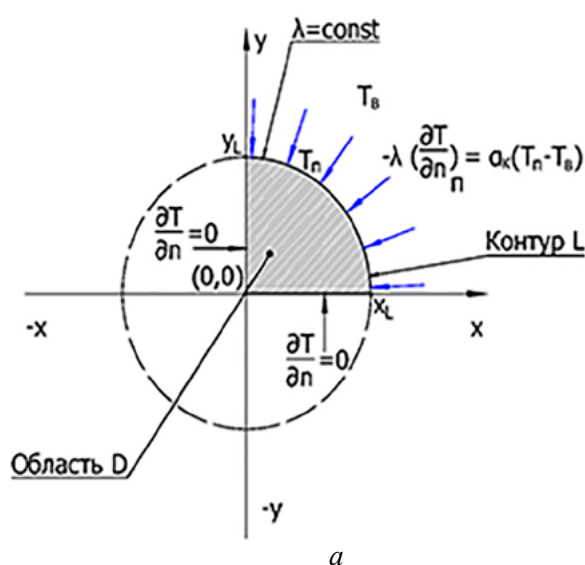


б

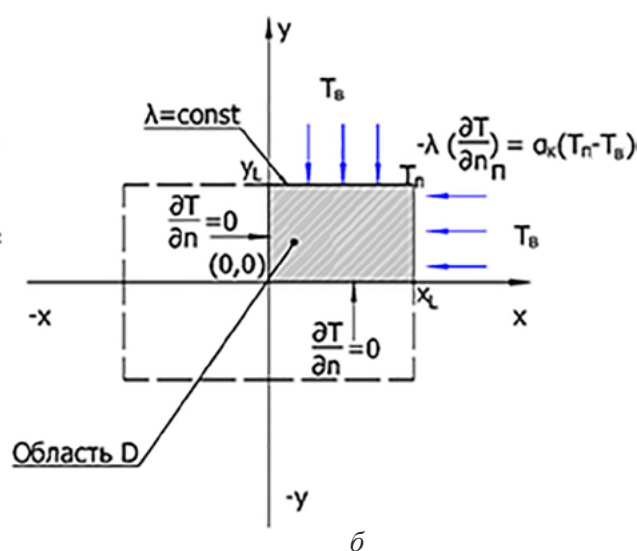
Рис. 3. Внешний вид упаковки и принятая геометрическая модель:
а — упаковка плодоовощей (помидоры); б — геометрическая модель упаковки

Рассмотрим упаковку с плодоовощами (помидорами). С учетом технологических зазоров, образуемых между объектами внутри упаковки при соблюдении технологии укладки, охлаждение каждого объекта в упаковке происходит одинаковым образом. Поскольку отклонениями при охлаждении можно пренебречь, для оценки эффекта охлаждения достаточно проанализировать температурное поле одного из объектов [9].

В расчете принято, что материал объекта однороден, теплообмен на границах происходит равномерно, отсутствуют асимметричные источники теплоты, фазовые переходы исключены, распределение температуры по объекту происходит симметрично — задача сводится к двумерной области. Относительно плоскостей, проходящих через середину объекта, верхняя и нижняя части объекта симметричны, как показано на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Постановка задачи теплопроводности для расчета температурного поля объекта:
а — плодоовощ; б — прямоугольный груз

Рассматриваемая расчетная область D задается как:

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq X_L \\ 0 \leq y \leq Y_L \end{cases}. \quad (1)$$

Уравнение процесса теплопроводности в данном случае примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]. \quad (2)$$

Начальные условия:

$$T(x, y) = T_0, \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L, x \in D \\ 0 \leq y \leq Y_L, y \in D \end{cases}. \quad (3)$$

Граничные условия при охлаждении объекта:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L \text{ при } y = 0 \\ 0 \leq y \leq Y_L \text{ при } x = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = \alpha_k (T_n - T_b) \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L, x \in L \\ 0 \leq y \leq Y_L, y \in L \end{cases}, \quad (5)$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м · К);

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

ρ — плотность, кг/м³;

α_k — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);

T_b — температура среды (воздуха), К;

T_n — температура поверхности тела, К.

Полученные уравнения и условия формируют замкнутую систему для определения $T(x, y)$ в заданной области D . Температура среды в камеры определяется по формуле:

$$T_b = T_n - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Q_{xi} - \sum_{j=2}^m Q_j \right)}{(kA)}, \quad (6)$$

где Q_{xi} — мощность i -го источника холода, Вт;

$\sum_{j=2}^m Q_j$ — дополнительные теплопритоки, Вт, без

учета теплопритоков через ограждающие конст-

рукции. Для моделирования приняты условия максимальной тепловой нагрузки с учетом постоянных и периодических теплопритоков [10]. Требуемый расход хладагента (СПГ), кг/ч:

$$m_{\text{спг}} = \begin{cases} \Delta Q \frac{3600}{r}, & \text{если } \Delta Q > 0 \\ 0, & \text{если } \Delta Q \leq 0, \end{cases}$$

$$\Delta Q = \sum Q_j - Q_{\text{хол}}^{\Phi}, \quad (7)$$

где r — среднее значение теплоты парообразования хладагента, для метана $r = 511\,000$ Дж/кг; $Q_{\text{хол}}^{\Phi}$ — фактическая холодопроизводительность основной холодильной установки.

$$Q_{\text{хол}}^{\Phi} = \eta(T_n) Q_{x1} = 1 - \alpha(T_n - T_{\text{ном}}) Q_{x1}, \quad (8)$$

где $\alpha = 0,015$ — коэффициент снижения мощности установки, 1/°С;

T_n — фактическая температура среды вне контейнера, °С;

$T_{\text{ном}}$ — температура, при которой холодопроизводительность установки соответствует наибольшему значению из диапазона номинальных, °С.

Моделирование и проверка

Для установления корректности модели охлаждения проведено сопоставление результатов численного моделирования охлаждения плодовоощей (красного помидора) и полученных экспериментальных данных. Эксперимент проведен в климатической камере. Температура плода измерена четырехканальным цифровым регистратором температуры на базе Arduino и датчиков типа ТХА второго класса, погрешность регистратора $\pm 0,3$ °С. Температура воздуха в камере фиксировалась термометром сопротивления РТ100 с погрешностью $\pm 0,1$ °С.

Сравнение проведено для температуры плодовооща в заданной области по трем точкам на поверхности и в центре. Результаты приведены на рис. 5.

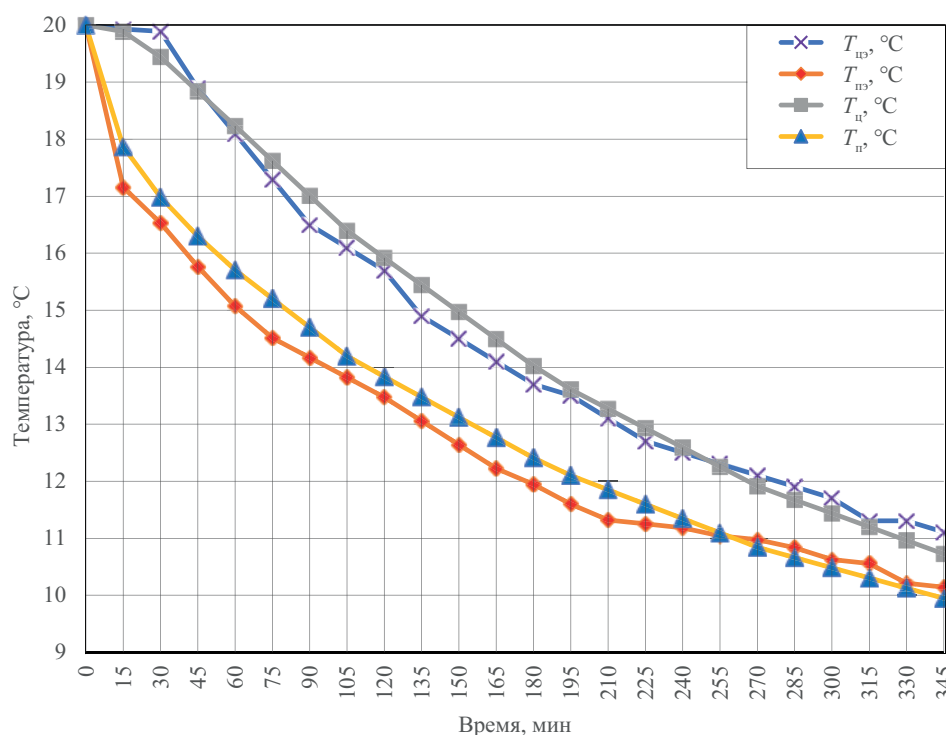


Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента с расчетными данными:

$T_{ц}$, $T_{п}$ — расчетные значения модели, °C; $T_{цз}$, $T_{пз}$ — усредненные экспериментальные значения, °C

Как было указано выше, производительность встроенной холодильной установки рефконтейнера с хладагентом R134a составляет 4200 Вт в зависимости от внешних тепловых нагрузок. Температура среды вне контейнера принята $T_{н} = 35$ °C, температура хранения плодоовощей (красногопомидора) усредненно принята $T_{в} = 7,5$ °C в соответствии с ГОСТ Р 58664—2019. Суммарные теплопритоки $\sum Q_j = 4460,1$ Вт в контейнер превышают холодопроизводительность основной установки. Тогда, в соответствии с формулой (7), требуемый расход СПГ в качестве дополнительного хладагента составит $m_{спг} = 1,82$ кг/ч. Для оценки воспроизводимости модели и эксперимента были проведены множественные повторения с расчетом статистических показателей согласованности результатов. Анализ воспроизводимости показал низкую вариабельность: стандартное отклонение температур на поверхности плода составило менее 0,3 °C при пятикратном повторении эксперимента ($n = 5$).

Для определения достоверности математической модели расчетные и измеренные температуры сравниваются на основе среднеквадратической ошибки ($RMSE$):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2}. \quad (9)$$

Полученные в результате моделирования и эксперимента кривые согласуются и показывают монотонное охлаждение. Расчетные значения ($T_{ц}$, $T_{п}$) повторяют тренд экспериментальных значений ($T_{цз}$, $T_{пз}$).

Значение средней квадратичной ошибки $RMSE$ варьировалось в диапазоне 0,42 до 0,52 °C. Характер расхождения температур в помидоре обусловлен особенностями нестационарных процессов теплообмена в гетерогенных средах и связан с упрощениями, принятыми при задании граничных условий математической модели.

Полученные значения ошибки говорят об удовлетворительном совпадении расчетных

и экспериментальных данных и согласуются с данными, полученными в ходе аналогичных опытов [11, 12].

Проверка модели

В данной работе сформулирована нестационарная задача теплопроводности для грузов различных форм и произведен расчет расхода хладагента вспомогательной холодильной установки с использованием топливного СПГ для компенсации пиковых теплопритоков, вызванных повышением температуры окружающего контейнер воздуха.

Расчетное значение расхода хладагента 4,23 кг/ч обеспечивает тепловое равновесие внутри контейнера и соответствует расчетным значениям, допустимым для электроснабжения автономного рефрижераторного контейнера [5, 6].

Валидация постановки задачи теплопроводности проверена в результате сравнения численной модели и экспериментальных данных. Проведенное сравнение показало удовлетворительную степень сходства, среднеквадратическая ошибка $RMSE$ усредненных показателей ниже 0,52 °С. Полученное значение не превышает допустимые при перевозке плодоовощей отклонения температуры.

Таким образом, сравнение расчетных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность предложенного подхода для прогнозирования динамики охлаждения плодоовощных грузов в автономных контейнерах.

Принятый уровень точности позволяет рекомендовать результаты исследования для оптимизации режимов работы холодильных установок при транспортировке режимных грузов и для дальнейшего совершенствования систем контроля температурных режимов.

Для более точного прогнозирования температуры объектов и полной оценки влияния СПГ на температуру плодоовощей и других режимных грузов в рефрижераторных контейнерах необходимо провести дополнительные исследования.

Список источников

1. Перевозки контейнеров по сети РЖД по итогам 2024 года выросли на 5,9 % до 7,9 млн TEU // InfraNews. — URL: <https://www.infranews.ru/logistika/containeri/66616-perevozki-kontejnerov-po-seti-rzhd-po-itogam-2024-goda-vyrosli-na-5-9-do-7-9-mln-teu/> (дата обращения: 22.06.2025).
2. Перевозки контейнеров по сети РЖД в 2025 году могут достичь 8 млн TEU — ИЭРТ // Сайт ОАО «ОАО» РЖД. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=222971> (дата обращения: 22.06.2025).
3. Тертеров М. Н. Железнодорожный хладотранспорт / М. Н. Тертеров, Н. Е. Лысенко, В. Н. Панферова. — М.: Транспорт, 1987. — 255 с.
4. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. — URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 22.06.2025).
5. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге «РЖД». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325994> (дата обращения: 22.06.2025).
6. Киселев И. Г. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами / И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 4. — С. 104–113. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113.
7. Ворон О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). — 2019. — № 3(78). — С. 188–192. — DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192.
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Chapter 19 Thermal Properties of Foods, ASHRAE Handbook 2022.
9. Defraeye T. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics / T. Defraeye, P. Cronjé, P. Verboven, U. L. Opara et al. // Postharvest Biology and Technology. — 2015. — Iss. 108. — Pp. 91–101. — DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.004.

10. Ефимов В. В. Теплотехнический расчет рефрижераторных транспортных модулей: метод. указания / В. В. Ефимов. — СПб.: ПГУПС, 2003. — 64 с.

11. Tagliavini G. Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain / G. Tagliavini, T. Defraeye, J. Carmeliet // *Food and Bioprocess Processing*. — 2019. — Iss. 117. — Pp. 310–320. — DOI: 10.1016/j.fbp.2019.07.013.

12. Chen Y.-M. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities / Y.-M. Chen, H.-Y. Song, Z.-S. Chen, R. Zhao et al. // *Food Science & Nutrition*. — 2020. — Vol. 8. — Iss. 12. — Pp. 6592–6602. — DOI: 10.1002/fsn3.1951.

Дата поступления: 23.07.2025

Решение о публикации: 01.09.2025

Контактная информация:

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — д-р техн. наук, проф.;
tatkiselev4.igor@yandex.ru

ГАЛОВ Владимир Викторович — канд. техн. наук,
доц.; v_galov@hotmail.com

КУДРИН Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доц.;
kudrin-mik@list.ru

МОНАСТЫРСКИЙ Дмитрий Ярославович —
аспирант; swen_88@mail.ru

Determining Temperature Fields of Various Cargo Transported in Autonomous Refrigerated Containers Using Liquefied Natural Gas (LNG) Cooling

I. G. Kiselev, V. V. Galov, M. Yu. Kudrin, D. Ya. Monastyrsky

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kiselev I. G., Galov V. V., Kudrin M. Yu., Monastyrsky D. Ya. Determining Temperature Fields of Various Cargo Transported in Autonomous Refrigerated Containers Using Liquefied Natural Gas (LNG) Cooling // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 938–946. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-938-946

Summary

Purpose: To develop a methodology for assessing cargo thermal condition by determining the temperature fields of various temperature-regulated goods during their transportation in autonomous refrigerated containers using liquefied natural gas (LNG). To validate the model experimentally. To determine a method for calculating the required LNG consumption for establishing thermal equilibrium in the container. **Methods:** The determination of the cargo temperature fields was reduced to solving a heat conduction problem in a two-dimensional domain with third-kind boundary conditions and to obtaining the corresponding temperature fields. The method for calculating the LNG consumption to maintain thermal equilibrium was developed based on the heat balance method. **Results:** A mathematical model describing the heat exchange in cargo during transportation in an autonomous refrigerated container using LNG cooling has been developed and experimentally validated. A method for calculating LNG consumption to compensate for excessive heat gains has been formulated. The calculations and resulting temperature fields have been presented for a transportation scenario involving fruits and vegetables. **Practical significance:** The findings of this study can be used to optimize refrigerated transport conditions and to develop new container cooling systems using LNG as an auxiliary cooling source.

Keywords: Autonomous refrigerated containers, cooling, refrigerated transportation, liquefied natural gas, temperature fields.

References

1. *Perevozki konteynerov po seti RZhD po itogam 2024 goda vyrosli na 5,9% do 7,9 mln TEU* [Container transportation through the RZD network increased by 5.9% to 7.9 million TEU in 2024]. InfraNews. Available at: <https://www.infranews.ru/logistika/containeri/66616-perevozki-konteynerov-po-seti-rzhd-po-itogam-2024-goda-vyrosli-na-5-9-do-7-9-mln-teu/> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
2. *Perevozki konteynerov po seti RZhD v 2025 godu mogut dostich' 8 mln TEU — IERT* [Container transportation through the RZD network in 2025 may reach 8 million TEU — IERT]. RZD website. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=222971> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
3. Terterov M. N., Lysenko N. E., Panferova V. N. *Zheleznodorozhnyy khladotransport* [Railway cold transport]. Moscow: Transport Publ., 1987, 255 p. (In Russian)
4. *Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda* [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035]. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
5. *Kontseptsiya kompleksnogo razvitiya konteynernogo biznesa v kholdinge "RZhD"* [Concept of integrated development of container business in the RZD holding]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902325994> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
6. Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrskiy D. Ya. *O tselesoobraznosti ispol'zovaniya szhizhennogo prirodnogo gaza na refrizheratornykh konteynerakh s navesnymi dizel'-generatorami* [On the feasibility of using liquefied natural gas in refrigerated containers with mounted diesel generators]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2021, Iss. 4, pp. 104–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113. (In Russian)
7. Voron O. A. *Ispol'zovanie szhizhennogo prirodnogo gaza v kombinirovannoy energosilovoy ustanovke avtonomnogo refrizheratornogo vagona* [Use of liquefied natural gas in a combined power plant of an autonomous refrigerated car]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VESTNIK VNIIZhT)* [Bulletin of Railway Research Institute]. 2019, Iss. 3(78), pp. 188–192. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192. (In Russian)
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Chapter 19 Thermal Properties of Foods, ASHRAE Handbook 2022.
9. Defraeye T., Cronjé P., Verboven P., Opara U. L. et al. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, Iss. 108, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.004.
10. Efimov V. V. *Teplotekhnicheskiiy raschet refrizheratornykh transportnykh moduley: metodicheskie ukazaniya* [Thermal calculation of refrigerated transport modules: methodical guidelines]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2003, 64 p. (In Russian)
11. Tagliavini G., Defraeye T., Carmeliet J. Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, Iss. 117, pp. 310–320. DOI: 10.1016/j.fbp.2019.07.013.
12. Chen Y.-M., Song H.-Y., Chen Z.-S., Zhao R. et al. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities. *Food Science & Nutrition*. 2020, vol. 8, Iss. 12, pp. 6592–6602. DOI: 10.1002/fsn3.1951.

Received: July 23, 2025

Accepted: September 01, 2025

Author's information:

Igor I. KISELEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; tatkiselev4.igor@yandex.ru

Vladimir V. GALOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_galov@hotmail.com

Michael Yu. KUDRIN — PhD in Engineering, Associate Professor; kudrin-mik@list.ru

Dmitrii Ya. MONASTYRSKII — Postgraduate Student; swen_88@mail.ru