

С. В. Буриков, Л. В. Цыганская

УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА ОБЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВАГОНОВ-ТЕРМОСОВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ *

Аннотация. Целью работы является разработка и апробация уточненной методики оценки общего коэффициента теплопередачи изотермического подвижного состава, учитывающей основные особенности ограждающих конструкций, влияющих на теплотехнические характеристики вагонов-термосов, к которым относятся: конструкция и способ уплотнения дверного проема и двери, соединение стен с крышей и рамой, соединение между боковой и торцевой стеной, конструктивные тепловые мостики, гидрозатвор (сливной прибор).

Расчет коэффициента теплопередачи вагона-термоса выполнялся по аналитическим зависимостям и уточненной методике, полученные результаты верифицировались по данным натурных испытаний и показали высокую степень сходимости с результатами натурных экспериментов, расхождение не превысило 5 %.

Уточненная методика может быть использована при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при создании и совершенствовании конструкций изотермического подвижного состава, в том числе с использованием новых технологий изготовления и материалов.

Ключевые слова: изотермический подвижной состав, вагон-термос, коэффициент теплопередачи, теплотехнический расчет, ограждающая конструкция кузова.

Для цитирования: Буриков, С. В. Уточненная оценка общего коэффициента теплопередачи вагонов-термосов на этапе проектирования / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 82–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_82.

Введение

Ожидаемое массовое списание вагонов-термосов по истечении уже продленного срока их службы требует организации массового производства изотермических и рефрижераторных вагонов в Российской Федерации. В этих условиях особую важность приобретает уточненный расчет теплотехнических характеристик на стадии проектирования создаваемых изотермических вагонов с применением эффективных теплоизолирующих материалов (пенополиуретан, пенополистирол и др.) [1, 2].

Основным технико-эксплуатационным показателем, определяющим способность вагона-термоса поддерживать необходимый температурный режим, является общий коэффициент теплопередачи кузова K . Величина коэффициента теплопередачи в соответствии с действующими нормативами [3] должна составлять:

- для вагонов-термосов с нормальной изоляцией не более $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- для моделей с усиленной теплоизоляцией не более $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Соблюдение данных требований гарантирует, что вагон сможет поддерживать стабильную температуру внутри грузового пространства даже при длительных перевозках в условиях широкого спектра наружных температур от -60 до $+50$. Это особенно важно для перевозки скоропортящихся продуктов, фармацевтических грузов и других термочувствительных материалов, где отклонение от заданного температурного режима может привести к порче товара.

Точное прогнозирование теплотехнических характеристик на этапе проектирования позволяет избежать дорогостоящих доработок и повторных натурных испытаний изотермических вагонов. Существующие методы расчета не позволяют с достаточной степенью точности определять значение общего коэффициента теплопередачи вагона [4, 5], расхождение с испытаниями может составлять от 30 до 50 %.

Таким образом, совершенствование методики расчета теплотехнических характеристик вагонов-термосов является актуальной задачей, решение которой позволит с большей степенью достоверности прогнозировать значение общего коэффициента теплопередачи кузова изотермического вагона.

* Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Основная часть

Уточненная методика основывается на методе конечных элементов (МКЭ) и по сравнению с аналитическими методами расчета [4–7] позволяет рассчитать тепловой поток в зонах конструкции, имеющих сложную конфигурацию, такие как: дверной проем и дверь с уплотнениями, соединение стен с крышей и рамой, соединение между боковой и торцевой стеной, конструктивных тепловых мостиков, гидрозатвор (сливной прибор). Конструктивные тепловые мостики (зоны с наибольшей теплопроводностью) представляют собой элементы ограждающей конструкции, служащие для соединения внутренней и наружной обшивки кузова, исключить которые не представляется возможным по конструктивным или технологическим причинам.

Расчет по уточненной методике выполняется в несколько этапов [8–10]:

- на первом этапе разрабатывается 3D-модель в программном комплексе SolidWorks, Компас-3D и др. ограждающей конструкции изотермического вагона;
- на втором этапе в программном комплексе Ansys Workbench выполняется подготовка к расчету, задаются граничные условия (условия симметрии при использовании симметричной конструкции, температура внутри и снаружи вагона, тепловые притоки) и применяемые материалы;
- на третьем этапе проводится расчет, определяется затраченная мощность при выравненной температуре между наружными и внутренними поверхностями ограждающей конструкции изотермического вагона;
- на четвертом этапе оцениваются результаты теплотехнического расчета по критерию затрат мощности теплового потока и по формуле (1) определяется общий коэффициент теплопередачи вагона [3, 10]

$$K = \frac{Q_m}{F_{cp}(\Delta t)} ; \quad (1)$$

где Q_m – затраченная мощность теплового потока, Вт;
 Δt – разница температур на наружной и внутренней поверхности грузового отделения вагона, К;
 F_{cp} – средняя площадь грузового отделения вагона, м², определяется по формуле (2) [4, 5]

$$F_{cp} = \sqrt{F_n \cdot F_{вн}} . \quad (2)$$

В качестве примера применения уточненной методики был проведен теплотехнический расчет вагона-термоса модели 16-1807-04, разработанного ООО «ГСКБВ» и поставленного на производство ТОО «Cool Infinity», модель вагона приведена на рис. 1. Технические характеристики вагона приведены в табл. 1.

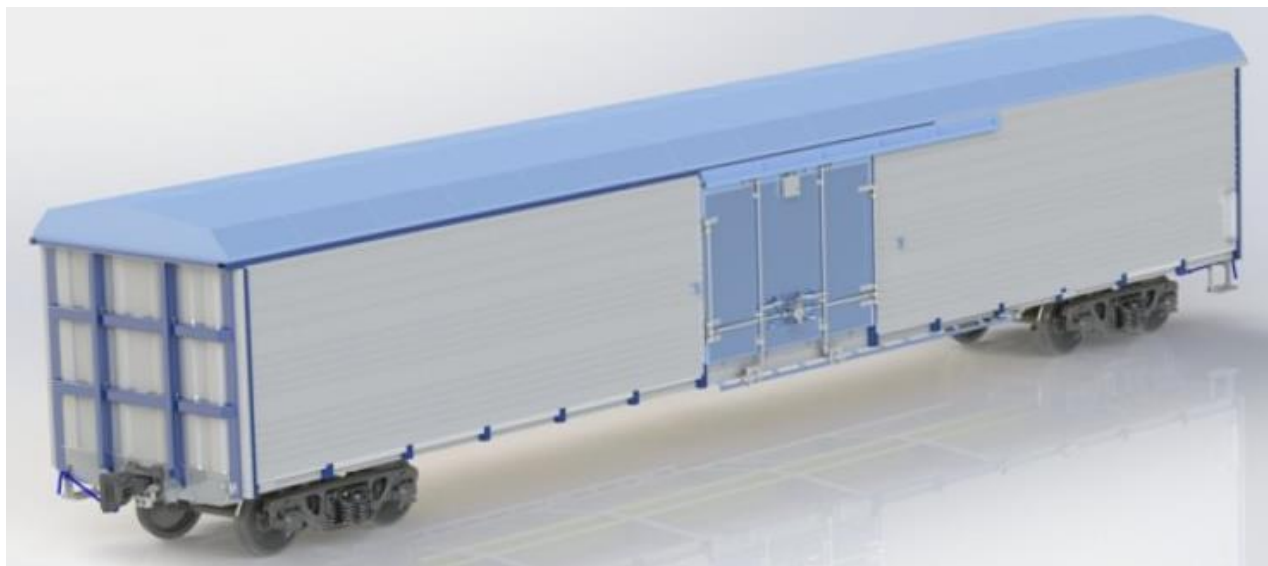


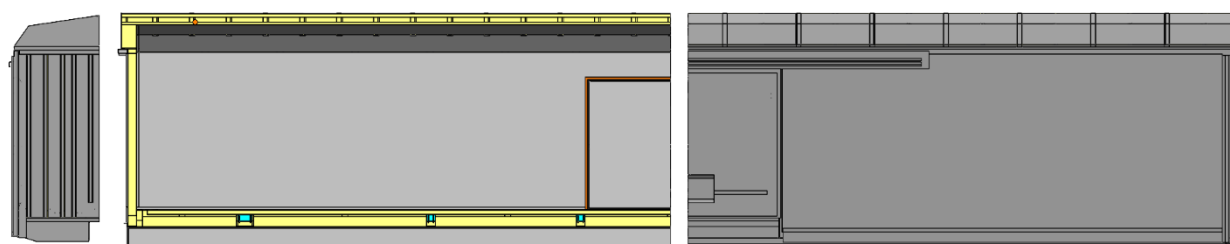
Рис. 1. Вагон-термос модели 16-1807-04

Таблица 1

Технические характеристики вагона-термоса модели 16-1807-04

Наименование параметра и размерность	Значение
Грузоподъемность, т	60,0
Масса тары (максимальная), т	36,0
Объем кузова, м ³	145,0
Площадь пола, м ²	50,5
Коэффициент теплопередачи ограждений кузова, Вт/м ² ·град	0,2...0,3
Наружная поверхность кузова вагона, м ²	242,6
Внутренняя поверхность кузова вагона, м ²	212,9

Для проведения теплотехнического расчета была разработана конечно-элементная модель вагона-термоса модели 16-1807-04 (рис. 2). Для сокращения времени расчета в модели учтены условия симметрии относительно продольной и поперечной осей вагона.

**Рис. 2. Расчетная модель вагона-термоса модели 16-1807-04**

Материалы элементов конструкции вагона-термоса, а также коэффициенты их теплопроводности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности материалов, применяемых в вагоне-термосе модели 16-1807-04

Материал	λ , Вт/(м·град)
Пенополиуретан (двухкомпонентная напыляемая пенополиуретановая система Daltotherm TSW 40-01 ТУ 20.16.40-068-10861980)	0,023
Стеклотекстолит (стеклотекстолит электротехнический листовой СТЭФ-У ТУ 2296-023-25082401)	0,29
Дерево (сосна):	
– поперек волокон	0,14
– вдоль волокон	0,29
Сталь 09Г2С (Ст3)	47,0
Уплотнитель (резина мягкая)	0,225
Стеклоткань	0,036

Для расчета общего коэффициента теплопроводности задавались следующие граничные условия:

- условия симметрии относительно продольной и поперечной оси вагона;
- температура внутри грузового помещения кузова вагона принималась $T_{вн} = 283$ К (10 °С);
- температура снаружи вагона принималась $T_{н} = 313$ К (40 °С);
- коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждений грузового помещения вагона при естественной циркуляции воздуха принимался равным $\alpha_{в} = 9$, Вт/(м²·град);
- коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности ограждения грузового помещения вагона $\alpha_{н}$ определялся по формуле (3) [4, 5]

$$\alpha_{н} = 1,16 \left(4,2 + 13\sqrt{V} \right), \quad (3)$$

где V – эксплуатационная скорость $V = 25$ м/с (90 км/ч);

- изменение температуры рассчитывалось во времени в течение 24 ч.

Условия термического нагружения вагона-термоса модели 16-1807-04 приведены на рис. 3.

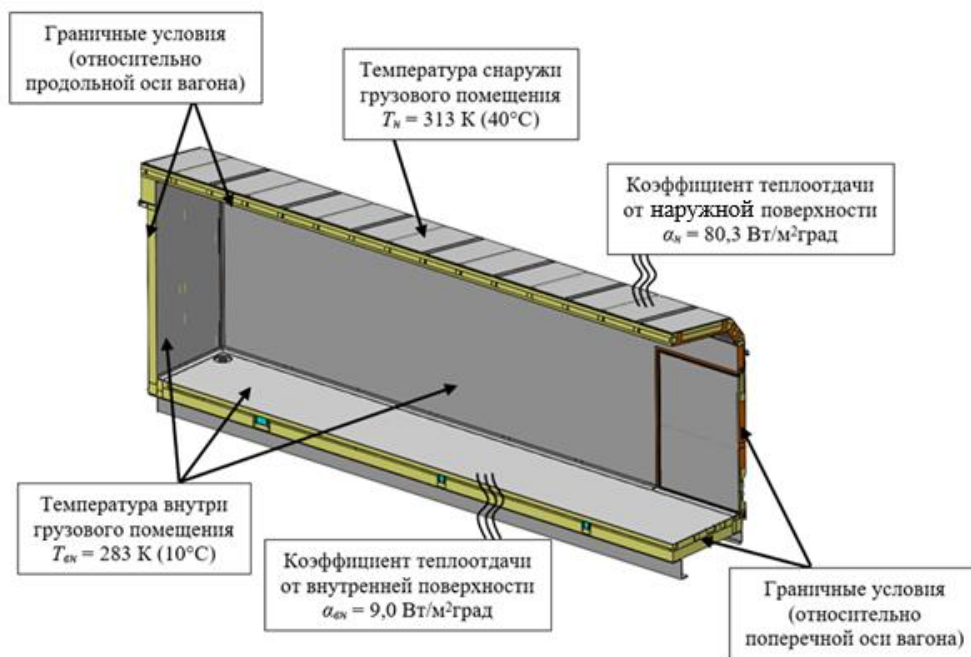


Рис. 3. Условия термического нагружения

В процессе расчета определена необходимая затраченная тепловая мощность для выравнивания температуры между наружными и внутренними поверхностями ограждающей конструкции кузова вагона. На рис. 4 приведен график распределения затраченной мощности теплового потока, полученный при проведении теплотехнического расчета.

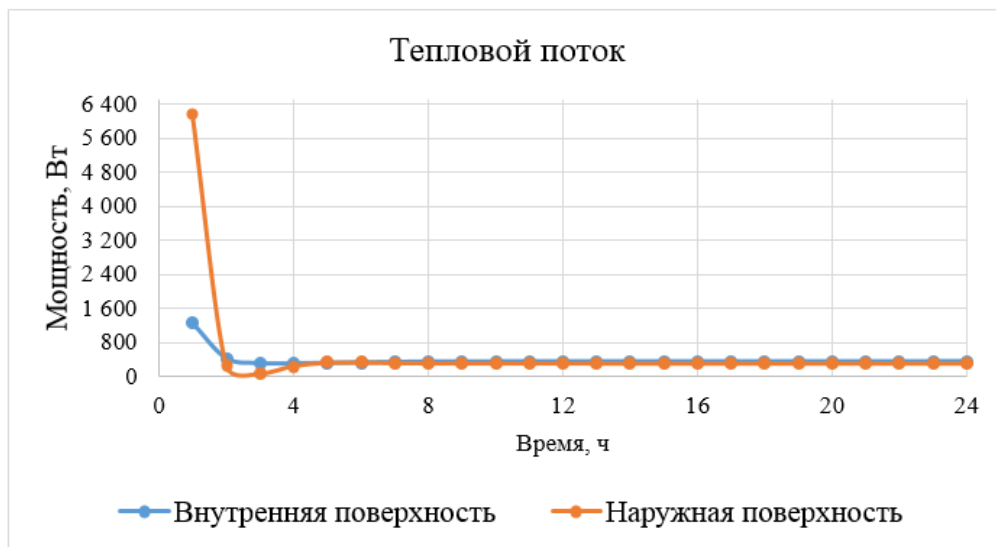


Рис. 4. График распределения затраченной мощности

Как видно из графика, затраченная мощность теплового потока между внутренними и наружными поверхностями кузова вагона спустя четыре часа стабилизируется и составляет 409,8 Вт. Учитывая, что расчет производился для четвертой части кузова вагона, общая затраченная мощность на весь вагон составит 1,64 кВт.

Графическая интерпретация результатов расчета, а именно распределение температурных полей в ограждающей конструкции вагона-термоса модели 16-1807-04, приведена на рис. 5.

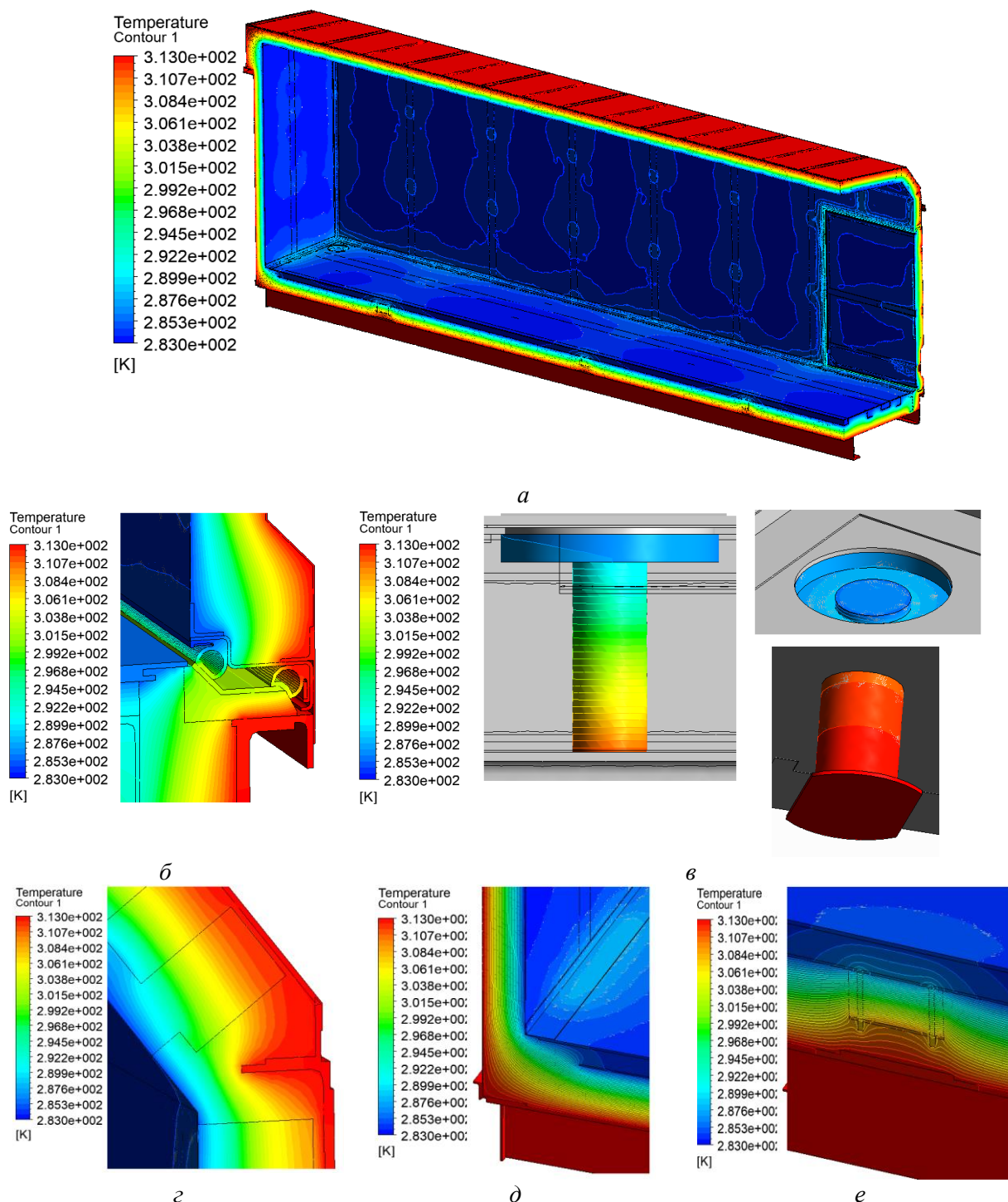


Рис. 5. Распределение температурного поля по ограждающей конструкции кузова вагона-термоса модели 16-1807-04:

а – общий вид; *б* – дверной проем; *в* – гидрозатвор; *г* – стыковка крыши с боковой стеной; *д* – стыковка торцевой стены с рамой вагона; *е* – тепловой мост в раме

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что основные потери тепла в конструкции вагона-термоса модели 16-1807-04 происходят в районе дверного проема, гидрозатвора и в местах конструктивных тепловых мостиков кузова вагона.

Подставив значения в формулу (1) и (2), в результате расчета по уточненной методике получим общий коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции вагона-термоса, которая составила $K = 0,249$ Вт/м²·град. При этом на этапе проектирования вагона-термоса модели 16-1807-04 теплотехнический расчет выполнялся аналитическим методом [4, 5], и общий коэффициент теплопередачи вагона составил $K = 0,22$ Вт/м²·град.

По результатам теплотехнических испытаний, проведенных АО «НИИАС», коэффициент теплопередачи изотермического вагона-термоса модели 16-1807-04 составил 0,26 Вт/м²·град [11]. Расхождение результатов теплотехнических испытаний с расчетом по уточненной методике составило 4,8 %.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1 Предложена и апробирована уточненная методика теплотехнического расчета вагонов-термосов на основе МКЭ. Ключевым преимуществом данной методики является возможность точного моделирования тепловых потоков в сложных конструктивных зонах (дверные проемы с уплотнениями, стыки панелей, тепловые мостики), что было недоступно при использовании традиционных аналитических методов. Уточненная методика позволяет не только получить более достоверную оценку, но и выявить «слабые» места конструкции на ранних стадиях проектирования.

2 Проведенный анализ выявил зоны наибольших теплопотерь в конструкции вагона, к которым относятся дверной проем и места расположения конструктивных тепловых мостиков. Это указывает на необходимость особого внимания к проектированию и герметизации данных узлов для дальнейшей оптимизации теплотехнических характеристик.

3 Сравнение полученных коэффициентов теплопередачи с результатами испытаний позволяет сделать вывод, что уточненная методика показала высокую степень сходимости, расхождение не превысило 5 % по сравнению с расхождением с аналитическим методом расчета, которое составляет ~20 %.

Таким образом, уточненная методика на основе МКЭ является эффективным инструментом для прогнозирования теплотехнических характеристик вагонов-термосов с высокой степенью достоверности. Ее внедрение в практику проектирования позволит сократить затраты на дорогостоящие доработки и натурные испытания, обеспечивая создание подвижного состава, гарантированно отвечающего требованиям по сохранности скоропортящихся и термочувствительных грузов.

Список литературы

- 1 Направления совершенствования технико-экономических и эксплуатационных параметров перспективных изотермических вагонов / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, О. В. Зиберов, Б. Г. Гаврилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 18–21. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Бороненко, Ю. П.** Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров / Ю. П. Бороненко, Б. А. Абдуллаев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 498–513. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513.
- 3 Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) 2024. – URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (дата обращения: 01.07.2025).
- 4 **Яковлев, И. Н.** Изотермический подвижной состав / И. Н. Яковлев, М. М. Шаповаленко. – Москва : Транспорт, 1977. – 230 с.
- 5 **Ягодин, С. К.** Изотермический подвижной состав / С. К. Ягодин, В. А. Саутенков. – Москва : Транспорт, 1986. – 192 с.
- 6 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стер. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.

References

- 1 Directions for improving the technical, economic and operational parameters of promising insulated wagons / O. A. Voron, Yu. P. Bulavin, O. V. Ziberov, B. G. Gavrillov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 18–21. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Boronenko, Yu. P.** Experimental studies of new constructive solutions for enclosing the bodies of refrigerated cars and containers / Yu. P. Boronenko, B. A. Abdullaev // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 498–513. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513.
- 3 Agreement on the International transportation of perishable foodstuffs and on special vehicles intended for these transportation (ATP) 2024. – URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (date of access: 01.07.2025).
- 4 **Yakovlev, I. N.** Isothermal rolling stock / I. N. Yakovlev, M. M. Shapovalenko. – Moscow : Transport, 1977. – 230 p.
- 5 **Yagodin, S. K.** Isothermal rolling stock / S. K. Yagodin, V. A. Sautenkov. – Moscow : Transport, 1986. – 192 p.
- 6 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – Ed. 2nd, stereotype. – Moscow : Energy, 1977. – 343 p.

7 **Нащокин, В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1975. – 496 с.

8 **Бубнов, В. М.** Методика расчета общего коэффициента теплопередачи ограждений изотермического подвижного состава / В. М. Бубнов, Л. В. Цыганская, С. В. Буриков // V Бетанкуровский международный инженерный форум : сборник трудов в 2 т., Санкт-Петербург, 29 ноября – 01 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 128–132.

9 **Буриков, С. В.** Увеличение вместимости изотермических вагонов за счет уточненного выбора технических решений конструкций теплоизоляции / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 262–267.

10 **Буриков, С. В.** Уточнение методов теплотехнических расчетов изотермического подвижного состава / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская, В. М. Бубнов // Железнодорожный подвижной состав : проблемы, решения, перспективы : материалы Третьей Международной научно-технической конференции, Ташкент, 17–20 апреля 2024 года. – Ташкент : Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. – С. 76–83.

11 Заключение по результатам предварительных теплотехнических испытаний опытного образца опытного образца изотермического вагона-термоса модели 16-1807-04, созданного по ТУ У 35.2-32258888-621:2011. – Москва : ОАО «НИИАС», 2013.

7 **Nashchokin, V. V.** Technical thermodynamics and heat transfer / V.V. Nashchokin. – Ed. 2nd, revised and additional. – Moscow : Higher School, 1975. – 496 p.

8 **Bubnov, V. M.** Methodology for calculating the total heat transfer coefficient of enclosures of isothermal rolling stock / V. M. Bubnov, L. V. Tsyganskaya, S. V. Burikov // V Betancourt International Engineering Forum : Proceedings in 2 vol., Saint Petersburg, November 29 – December 01, 2023. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2023. – P. 128–132.

9 **Burikov, S. V.** Increasing the capacity of insulated wagons due to an updated choice of technical solutions for thermal insulation structures / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Transport : problems, ideas, prospects : proceedings of the LXXXIV All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists, Saint Petersburg, April 15-22, 2024. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024. – P. 262–267.

10 **Burikov, S. V.** Refinement of methods of thermal engineering calculations of isothermal rolling stock / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya, V. M. Bubnov // Railway rolling stock : problems, solutions, prospects : materials of the third international scientific and technical conference, Tashkent, April 17–20, 2024. Tashkent : Tashkent State Transport University, 2024. – P. 76–83.

11 Conclusion based on the results of preliminary thermal engineering tests of the prototype of an insulated thermos car, model 16-1807-04, created according to TU U 35.2-32258888-621:2011. – Moscow : JSC “NIAS”, 2013.

S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya

AN UPDATED ESTIMATE OF THE TOTAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THERMOS WAGONS AT THE DESIGN STAGE

Abstract. The objective of this study is to develop and test a refined methodology for estimating the total heat transfer coefficient of isothermal rolling stock. This methodology takes into account the main features of enclosing structures that affect the thermal characteristics of thermos cars, which include: the design and sealing method of the doorway and door, the connection of walls with the roof and frame, the connection between the side and end wall, structural thermal bridges, a water lock (drain device).

The calculation of the heat transfer coefficient of the thermos car was carried out according to analytical dependencies and a refined methodology. The results were verified using full-scale testing data and demonstrated a high degree of agreement with the results of full-scale experiments, with a discrepancy of no more than 5%.

The updated methodology can be used in carrying out research and development work in the creation and improvement of structures of insulated rolling stock, including using new manufacturing technologies and materials.

Keywords: isothermal rolling stock, thermos car, heat transfer coefficient, thermal engineering calculation, car body enclosure.

For citation: Burikov, S. V. An updated estimate of the total heat transfer coefficient of thermos cars at the design stage / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 82–89. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_82.

Сведения об авторах

Буриков Сергей Витальевич

Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: b.s.v.3479@gmail.com

Цыганская Людмила Валериевна

Акционерное общество
«Научно-внедренческий центр “Вагоны”»
(АО «НВЦ “Вагоны”»),
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель генерального директора –
главный конструктор НИБ,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Information about the authors

Burikov Sergey Vitalievich

Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University (PGUPS),
Chair “Wagons and Wagon Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: b.s.v.3479@gmail.com

Tsyganskaya Lyudmila Valerievna

Joint-Stock Company «Scientific
and Implementation Center “Vagony”»
(JSC «NVC “Vagony”»),
Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University (PGUPS),
Chair “Wagons and Wagon Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Deputy General Director –
Chief Designer of NIB,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru