

С. В. Буриков, Л. В. Цыганская

ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНОВ-ТЕРМОСОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Аннотация. В работе рассматриваются технические решения получения путем пошаговой оптимизации ограждающих конструкций вагонов-термосов. Основной целью оптимизации является снижение материалоемкости без увеличения общего коэффициента теплопередачи.

Ключевым аспектом исследования является разработанный поэтапный алгоритм оптимизации, основанный на комбинации аналитических расчетов и метода конечных элементов. Это позволило оценить теплотехнические свойства конструкции, исключив теплоизоляцию в зонах, не влияющих на общий коэффициент теплопроводности вагона-термоса.

Результаты работы имеют практическую значимость для вагоностроительных предприятий, так как позволяют снизить себестоимость изготовления вагонов-термосов, уменьшить трудоемкость производства и улучшить их технико-экономические показатели.

Ключевые слова: вагон-термос, проектирование, оптимизация, метод конечных элементов, тепловые мосты, материалоемкость, коэффициент теплопередачи.

Для цитирования: Буриков, С. В. Выбор технических решений, ограждающих конструкции вагонов-термосов при проектировании / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 64–71. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_64.

Введение

Подходы оптимизации конструкций грузовых вагонов широко известны в инженерной практике и направлены в основном на снижение материалоемкости, стоимости, затрат на изготовление и обслуживание конструкций.

В грузовом вагоностроении одной из основных задач при разработке нового подвижного состава является обеспечение минимизации массы тары конструкции. Для снижения массовых характеристик грузовых вагонов используются методы: структурно-параметрический, топологической оптимизации, метод избыточной структуры и т.д. [1–3]. Данные методы хорошо себя зарекомендовали в задачах снижения металлоёмкости кузовов и литых элементов грузовых тележек. Задачи снижения материалоемкости ограждающих конструкций изотермических вагонов при проектировании решались путем оценки коэффициента теплопередачи для выбранных минимально необходимых толщин теплоизоляционных материалов. Подтверждение результатов проводилось путем натурных экспериментов [4–7], а также с учетом неопределенностей [8]. С появлением методики [9–11] стало возможным проводить уточненную оценку коэффициента теплопередачи и пошагово оптимизировать ограждающую конструкцию изотермических вагонов, а также визуализировать распределение температурных полей в конструкции, что позволяет выявить зоны, не влияющие на общий коэффициент теплопередачи вагона.

Снижение материалоемкости всегда имеет выраженный экономический эффект при условии обеспечения технологичности вагонной конструкции. Учитывая, что применение методов оптимизации к теплоизолирующим конструкциям ранее не использовалось в инженерной практике при проектировании вагонов-термосов, решение задачи снижения массы дорогостоящих теплоизоляционных материалов без увеличения общего коэффициента теплопередачи может в значительной мере повлиять на стоимость вагона и позволит улучшить его технико-экономические параметры.

Основная часть

Выбор технических решений ограждающих конструкций проводился на основании результатов, полученных путем пошаговой оптимизации конструкции.

Пошаговая оптимизация выполнялась по критерию снижения массы теплоизолирующих материалов при условии обеспечения неизменности мощности теплового потока, проходящего через ограждающую конструкцию вагона-термоса, и выполнялась в несколько этапов:

– на первом этапе разрабатывалась 3D-модель фрагмента конструкции вагона-термоса, выполнялась подготовка к расчету (задавались граничные условия расчета и применяемые материалы);

– на втором этапе проводился теплотехнический расчет, оценивались результаты расчета по критерию затрат мощности теплового потока;

– на третьем этапе по результатам расчета исключались зоны с теплоизолирующими материалами с минимальным тепловым потоком и проводился проверочный расчет;

– на четвертом этапе, если результаты расчета каждой последующей итерации тепловых потоков не превышают исходного варианта, то повторяется еще раз третий этап, а если результаты расчета теплового потока превышают значения исходного варианта, то на этом этапе оптимизация прекращается.

Алгоритм проведения работ по оптимизации ограждающей конструкции вагона-термоса приведен на рис. 1.

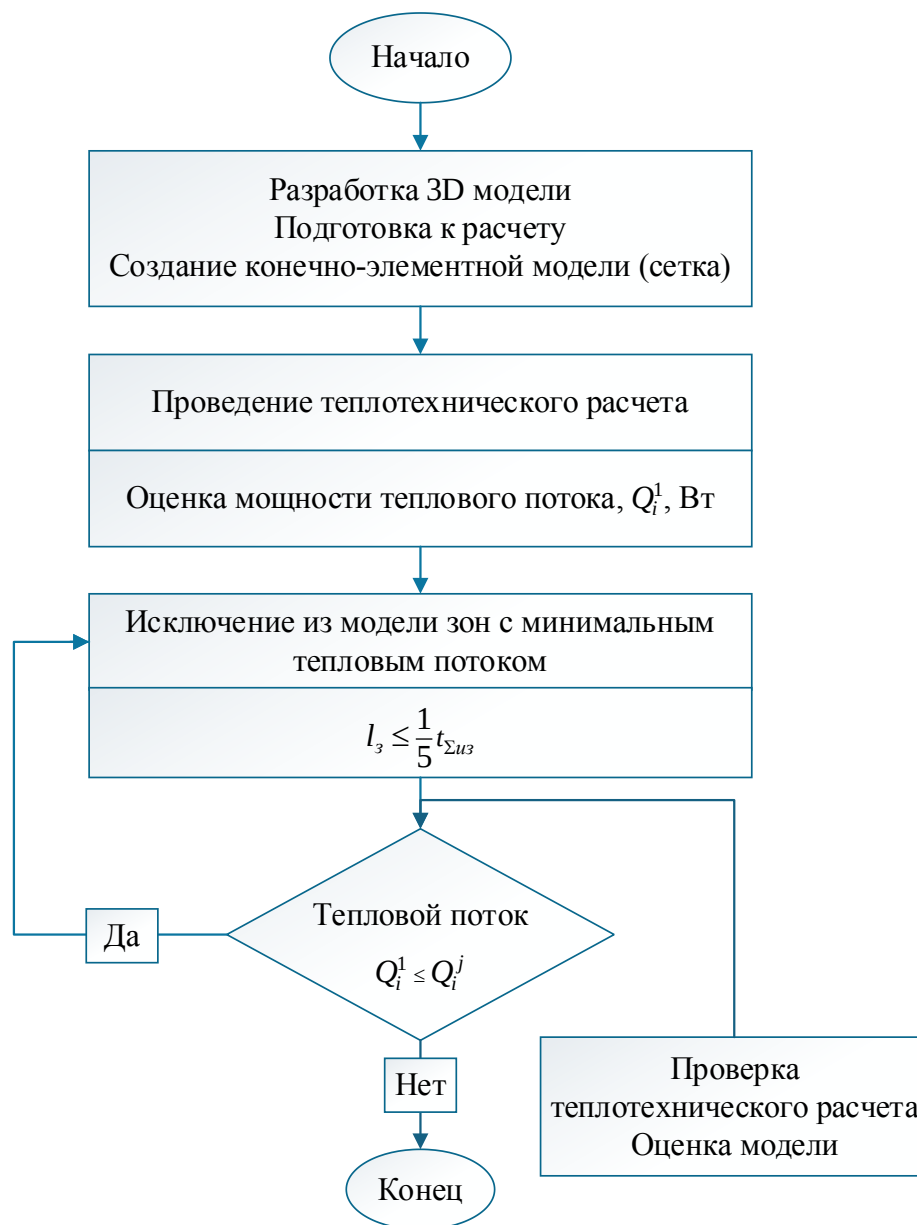


Рис. 1. Алгоритм оптимизации ограждающей конструкции вагона-термоса

Такой подход стал возможен благодаря новой методике оценки теплотехнических свойств изотермического подвижного состава [9–11]. Основная особенность методики заключается в комбинации аналитических методов расчета и метода конечных элементов, что позволяет повысить точность расчета в зонах с неравномерным тепловым потоком, вызванным влиянием зон тепловых мостов конструкций изотермических вагонов, конфигурации дверного проема, гидрозатворов (сливных приборов) и зон между стенами, полом и крышей.

Оценка теплотехнических свойств вагона производилась с использованием метода конечных элементов, например, в программном комплексе Ansys Workbench.

Теплотехнический расчет с применением метода конечных элементов заключается в том, чтобы определить, сколько необходимо затратить тепловой мощности, проходящей через ограждающую конструкцию вагона-термоса за определенное время. По результатам расчета мощности теплового потока можно определить коэффициент теплопередачи вагона по формуле (1) [12]:

$$K = \frac{Q_m}{F(t_n - t_{вн})}, \quad (1)$$

где Q_m – мощность теплового потока, Вт;

$t_n, t_{вн}$ – температура на наружной и внутренней поверхности грузового отделения вагона, К;

F – средняя площадь, м².

Основная цель выполненной оптимизации ограждающих конструкций вагонов-термосов – исключить теплоизолирующий материал из зон, не влияющих на общий коэффициент теплопередачи вагона, и соответственно повысить технологичность и уменьшить себестоимость изготовления изотермических вагонов.

На рис. 2 рассматривалась зона разрыва теплового моста рамы вагона-термоса модели 16-9577. Применение стеклотекстолитовых вставок для разрыва тепловых мостов было запатентовано [13, 14] и применяется в линейке изотермических вагонов, разработанных ООО «ГСКБВ».

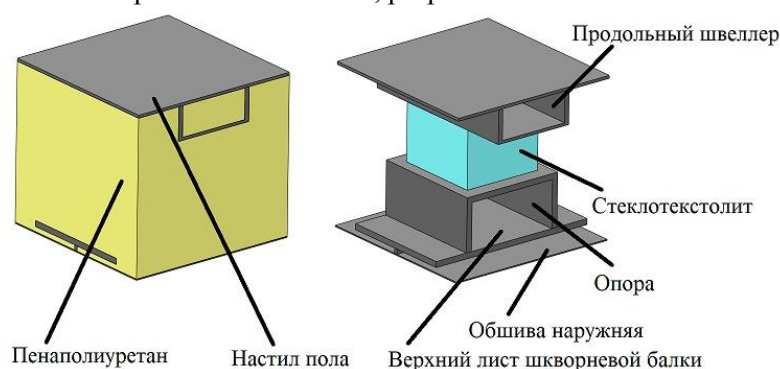


Рис. 2. Рассматриваемая зона для оптимизации

Корректность выполнения теплотехнического расчета с помощью метода конечных элементов имеет ряд особенностей, а именно корректировку контактов и построение конечно-элементной модели. Чтобы минимизировать погрешность результатов расчета, конечно-элементная модель (сетка) должна состоять из однотипных элементов (из гексаэдров либо тетраэдров) с максимально приближенными друг к другу линейными размерами. Конечно-элементная модель рассматриваемой зоны приведена на рис. 3. Также для повышения точности теплотехнического расчета исключены контактные связи между рассматриваемыми элементами путем объединения в одну деталь.

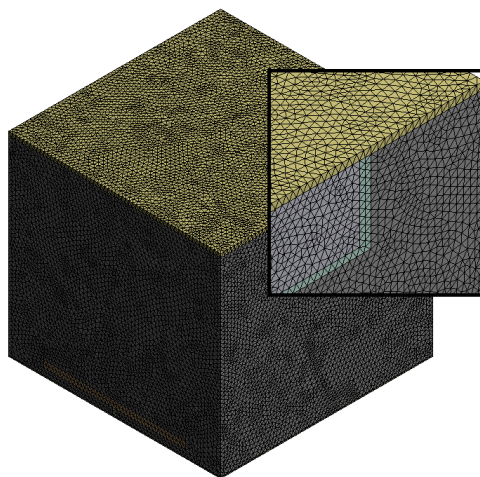


Рис. 3. Конечно-элементная модель рассматриваемой зоны вагона-термоса

Физико-механические свойства применяемых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

Параметр	Материал		
	сталь 09Г2С		сталь 09Г2С
Плотность ρ , кг/м ³	7850	Плотность ρ , кг/м ³	7850
Удельная теплоемкость C , Дж/кгК	434	Удельная теплоемкость C , Дж/кгК	434
Теплопроводность λ , Вт/м·град	33	Теплопроводность λ , Вт/м·град	33

По результатам расчета определены затраты мощности теплового потока в рассматриваемой зоне до и после оптимизации, которые приведены на графиках (рис. 4).

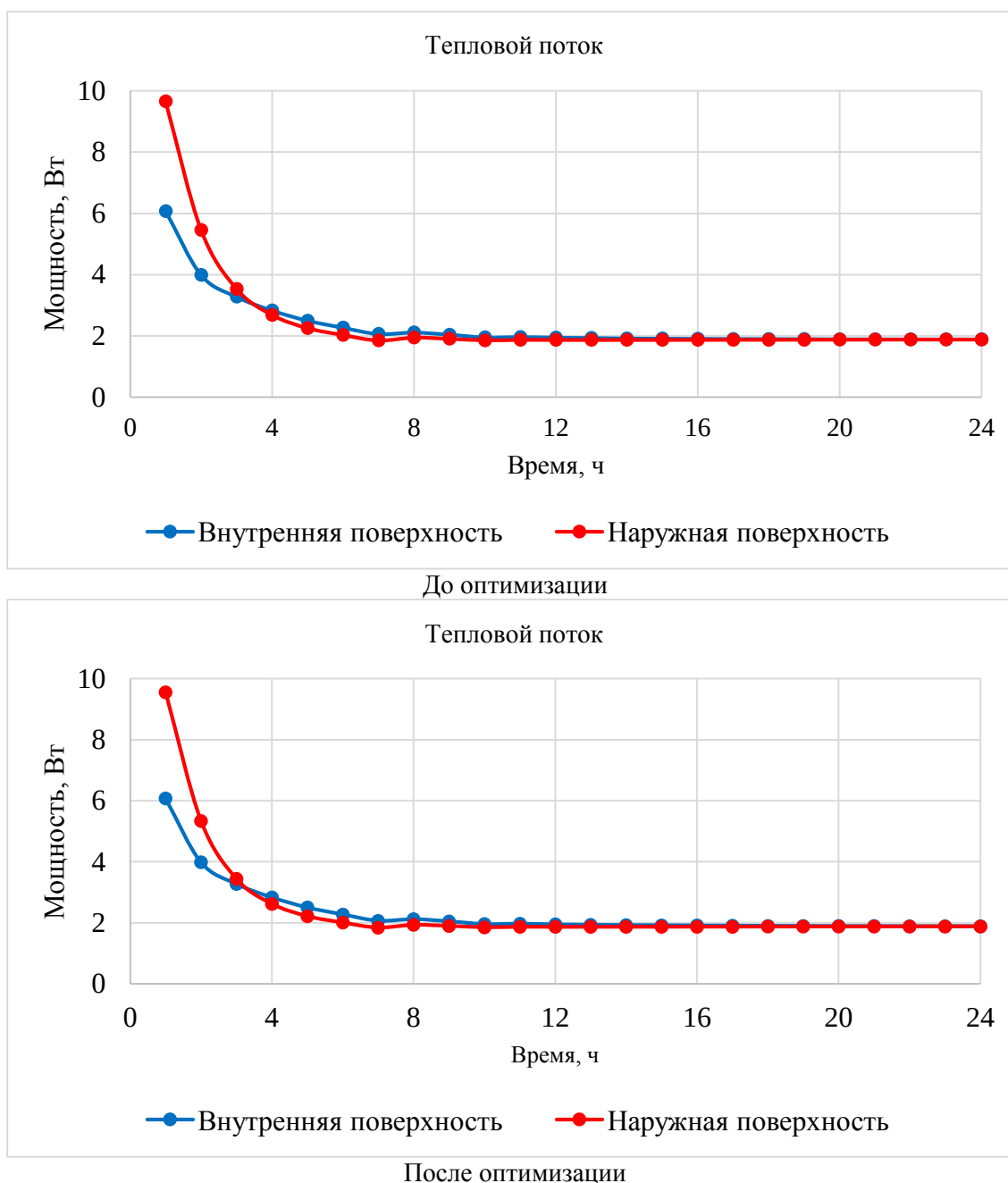


Рис. 4. График затраченной мощности теплового потока

Результаты расчета коэффициента теплопередачи по формуле (1) и рассматриваемой зоны приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента теплопередачи

Зона	F , м ²	t_n , К	$t_{вн}$, К	Q_m , Вт	K , Вт/м ² К
До оптимизации	0,09	308	273	1,882	0,597
После оптимизации					

По представленным результатам расчета видно, что при стабилизировавшемся процессе мощность теплового потока в конструкции выбранной зоны (см. рис. 1) до и после оптимизации составляет 1,882 Вт, следовательно, исключение теплоизоляционного материала из замкнутого профиля рассмотренной зоны не повлияло на теплотехнические характеристики ограждающей конструкции вагона-термоса.

На рис. 5 представлены распределение температурных полей в конструкции до и после оптимизации, из которого видно, что характер распределения температур на внутренней и наружных слоях рассматриваемого фрагмента конструкции неизменны.

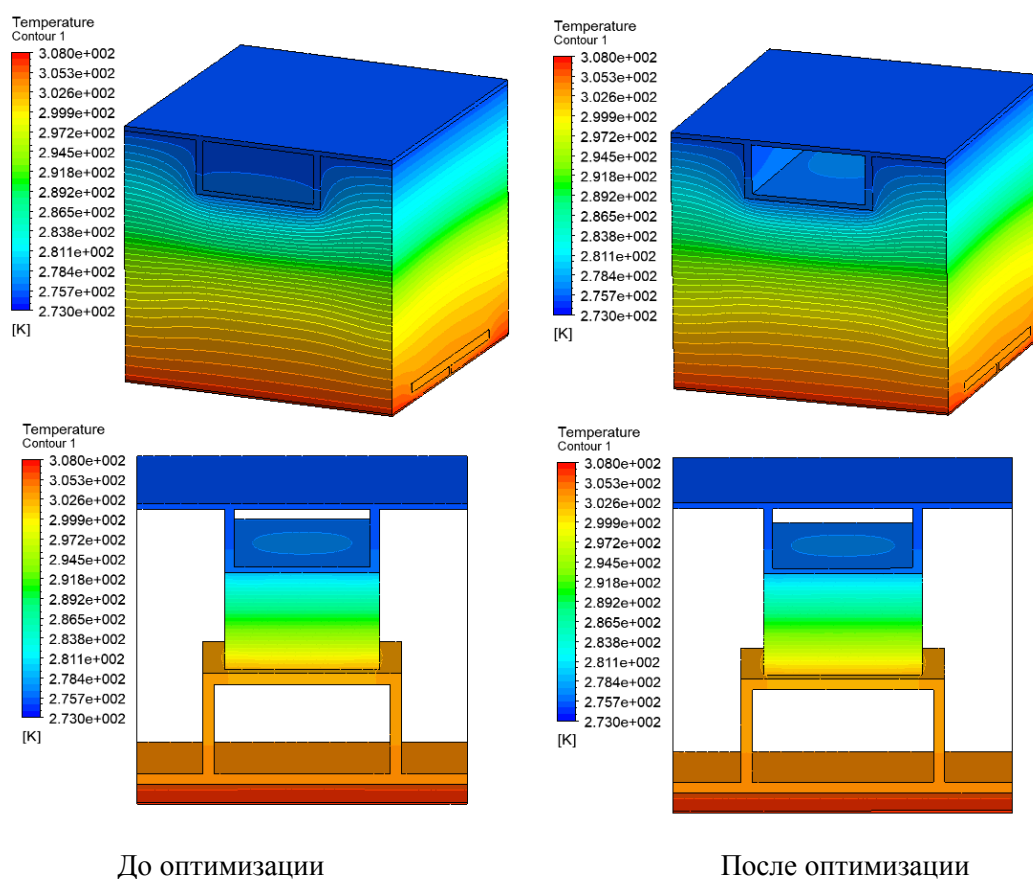


Рис. 5. Распределение температур в рассматриваемой зоне

Как видно из рис. 5 и табл. 2, исключение заполнения теплоизоляции в замкнутых пространствах не повлияло на теплофизические свойства рассматриваемой зоны и на коэффициент теплопередачи.

Пошаговая оптимизация была выполнена для всех характерных зон ограждающих конструкций вагона-термоса модели, в результате чего общее снижение массы теплоизоляционного материала составило ~120 кг, что составляет 7 % от исходной массы теплоизоляционного материала.

Выводы

1 Показан и описан пошаговый алгоритм выполнения оптимизации ограждающей конструкции вагона.

2 Проведена оптимизация ограждающей конструкции на примере вагона-термоса модели 16-9577.

3 Предложены и обоснованы технические решения, позволяющие снизить на 7 % объем теплоизолирующего материала, а также снизить трудоемкость при изготовлении вагонов-термосов.

Список литературы

- 1 **Бейн, Д. Г.** Оптимизация кузовов грузовых вагонов открытого типа с несущим полом : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бейн Дмитрий Григорьевич. – Брянск, 2011. – 20 с. – EDN QHQVGX.
- 2 **Булычев, М. А.** Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов / М. А. Булычев, Д. Г. Бейн. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2014. – 183 с. – ISBN 978-5-89838-766-2.
- 3 **Коршунов, В. С.** Модернизация с продлением срока изотермических вагонов (вагонов-термосов) / В. С. Коршунов, Л. В. Цыганская, К. В. Бондаренко // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : Материалы XI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 06–10 июля 2016 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. – С. 61–63. – EDN YFRWSN.
- 4 Типовая методика по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах, кроме изотермических цистерн и контейнеров-цистерн, на особых условиях : утв. вице-президентом ОАО «РЖД» от 04.12.2012 г. № 355.
- 5 **Дюбко, А. П.** Теплообмен при перевозке скоропортящихся грузов в вагонах-термосах / А. П. Дюбко, Е. А. Крутова // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 5. – С. 50–54.
- 6 **Голубин, А. А.** Разработка алгоритма по определению коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства на основе результатов анализа, происходящих в нем теплообменных процессов / А. А. Голубин, С. Н. Науменко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 5. – С. 306–311. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.
- 7 **Иванов, К. В.** Оценка влияния тепловой инерции кузова рефрижераторного вагона при нестационарном подогреве / К. В. Иванов, А. Е. Лукшин // Труды ЦНИИ МПС. – Москва : Транспорт, 1972. – Вып. 456. – С. 80–87.
- 8 **Теймуразов, Н. С.** Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических

References

- 1 **Bein, D. G.** Optimization of open-type freight car bodies with a load-bearing floor : specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification" : abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Bein Dmitry Grigorievich. – Bryansk, 2011. – 20 p. – EDN QHQVGX.
- 2 **Bulychev, M. A.** Mathematical modeling and optimization of gondola car bodies / M. A. Bulychev, D. G. Bain. – Bryansk : Bryansk State Technical University, 2014. – 183 p. – ISBN 978-5-89838-766-2.
- 3 **Korshunov, V. S.** Modernization with extension of the service life of isothermal cars (thermos cars) / V. S. Korshunov, L. V. Tsyganskaya, K. V. Bondarenko // Rolling stock of the XXI century : ideas, requirements, projects : Proceedings of the XI International scientific and technical conference, Saint Petersburg, July 6–10, 2016. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2016. – P. 61–63. – EDN YFRWSN.
- 4 Standard methodology for establishing temperature conditions and maximum periods for transportation by JSC Russian Railways of new types of perishable goods in isothermal transport vehicles, except for isothermal tanks and tank containers, under special conditions : approved by the Vice President of JSC Russian Railways on 04.12.2012 No. 355.
- 5 **Dyubko, A. P.** Heat exchange during transportation of perishable goods in thermos wagons / A. P. Dyubko, E. A. Krutova // Railway Research Institute Bulletin (Vestnik VNIIZhT). – 1984. – No. 5. – P. 50–54.
- 6 **Golubin, A. A.** Development of an algorithm for determining the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle based on the results of the analysis of heat exchange processes occurring in it / A. A. Golubin, S. N. Naumenko // The Russian Railway Science Journal. – 2017. – Vol. 76, No. 5. – P. 306–311. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.
- 7 **Ivanov, K. V.** Evaluation of the influence of thermal inertia of the body of a refrigerated car during non-stationary heating / K. V. Ivanov, A. E. Lukshin // Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways. – Moscow : Transport, 1972. – Issue 456. – P. 80–87.
- 8 **Teimurazov, N. S.** Accelerated methods for assessing the heat transfer coefficient of bodies

транспортных средств / Н. С. Теймуразов, С. Н. Науменко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2009. – № 5. – С. 18–21. – EDN KWPRYL.

9 **Давыдов, Д. О.** Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов / Д. О. Давыдов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 4. – С. 249–256. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256.

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. – EDN ITLSX.

11 **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-х томах, Санкт-Петербург, 29 ноября – 01 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 128–132. – EDN HGFQPM.

12 **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. – EDN NVTIFS.

13 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).

14 **Патент на полезную модель № 79505 U1 Российская Федерация, МПК B61D 17/00.** Кузов изотермического транспортного средства : № 2008106964/22 : заявл. 22.02.2008 : опубл. 10.01.2009 / В. М. Бубнов, В. С. Маринюк, И. В. Гуржи [и др.] ; заявитель Общество с ограни-

of isothermal vehicles / N. S. Teimurazov, S. N. Naumenko // The Russian Railway Science Journal. – 2009. – No. 5. – P. 18–21. – EDN KWPRYL.

9 **Davydov, D. O.** Methodology for calculating the overall heat transfer coefficient of the body of a special vehicle for the transportation of perishable goods / D. O. Davydov // The Russian Railway Science Journal. – 2019. – Vol. 78, No. 4. – P. 249–256. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256.

10 **Burikov, S. V.** Clarification of methods of heat engineering calculations of isothermal rolling stock / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya, V. M. Bubnov // Railway rolling stock : problems, solutions, prospects : Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 17–20, 2024. – Tashkent : Tashkent State Transport University, 2024. – P. 76–83. – EDN ITLSX.

11 **Bubnov, V. M.** Methodology for calculating the overall heat transfer coefficient of enclosures of isothermal rolling stock / V. M. Bubnov, L. V. Tsyganskaya, S. V. Burikov // V Betancourt International engineering forum : collection of papers in 2 volumes, Saint Petersburg, November 29 – December 01, 2023. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2023. – P. 128–132. – EDN HGFQPM.

12 **Burikov, S. V.** Increasing the capacity of isothermal cars due to a refined choice of technical solutions for thermal insulation designs / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Transport : problems, ideas, prospects : collection of works 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 St. Petersburg State Transport University, 2024. – P. 262–267. – EDN NVTIFS.

13 Agreement concerning the International carriage of perishable foodstuffs and the special vehicles used for such carriage (ATP) 2024. – URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (date of access: 01.07.2025).

14 **Utility Model Patent No. 79505 U1 Russian Federation, IPC B61D 17/00.** Body of an insulated transport vehicle : No. 2008106964/22 : declared 22.02.2008 : published 10.01.2009 / V. M. Bubnov, V. S. Marinyuk, I. V. Gurzhi [et al.] ; applicant Limited Liability Company "Head Specialized Design Bureau for Carriage Building". – EDN ZZZQCF.

ченной ответственностью «Головное специализированное конструкторское бюро вагоностроения».
– EDN ZZZQCF.

15 Бубнов, В. М. Перспективы применения текстолита для компенсации температурных мостиков в ограждающих конструкциях изотермического подвижного состава / В. М. Бубнов, С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : Материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 207–208. – EDN OMJPKE.

15 Bubnov, V. M. Prospects for the use of textolite to compensate for thermal bridges in enclosing structures of isothermal rolling stock / V. M. Bubnov, S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Rolling stock of the XXI century : ideas, requirements, projects : Proceedings of the XVII International scientific and technical conference, Saint Petersburg, August 21–24, 2023. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, 2024. – P. 207–208. – EDN OMJPKE.

S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya

THE CHOICE OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENCLOSING STRUCTURES OF THERMOS WAGONS DURING DESIGN

Abstract. The paper considers technical solutions obtained by step-by-step optimization of enclosing structures of thermos wagons. The main goal of optimization is to reduce material consumption without increasing the overall heat transfer coefficient.

A key aspect of the research is the developed step-by-step optimization algorithm based on a combination of analytical calculations and the finite element method. This made it possible to evaluate the thermal engineering properties of the structure, eliminating thermal insulation in areas that do not affect the overall coefficient of thermal conductivity of the thermos car.

The results of the work are of practical importance for wagon-building enterprises, as they make it possible to reduce the cost of manufacturing thermos wagons, reduce the labor intensity of production and improve their technical and economic performance.

Keywords: thermos wagon, design, optimization, finite element method, thermal bridges, material consumption, heat transfer coefficient.

For citation: Burikov, S. V. The choice of technical solutions for enclosing structures of thermos wagons during design / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 64–71. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_64.

Сведения об авторах

Буриков Сергей Витальевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (РГУПС),
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 (РГУПС),
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