

УДК.629.463.12

Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава

С. В. Буриков^{1,2}, Л. В. Цыганская^{1,2}

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² АО «Научно-внедренческий центр «Вагоны», Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 22м

Для цитирования: Буриков С.В., Цыганская Л. В. Теплоизоляционные материалы в конструкции изотермического подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 43–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-43-52

Аннотация

В статье проведен обзор теплоизоляционных материалов и выполнена расчетная оценка необходимых толщин теплоизоляции, применяемой в конструкции изотермического подвижного состава, предназначенного для перевозки скоропортящихся грузов с обеспечением заданного температурного режима. **Цель:** систематизация и сравнительный анализ теплоизоляционных материалов, используемых в ограждающих конструкциях изотермических вагонов, а также определение наиболее эффективных решений для обеспечения стабильного температурного режима при перевозке скоропортящихся грузов в различных климатических и эксплуатационных условиях. **Результаты:** проанализированы основные виды теплоизоляции с учетом их коэффициента теплопроводности, физико-механических свойств, влагостойкости, огнестойкости и эксплуатационной долговечности. Приведена сравнительная характеристика традиционных и современных теплоизоляционных материалов (пенополиуретан, пенополистиролы, минеральная вата, пеностекло, вакуумные изоляционные панели и др.), а также определены их преимущества, недостатки и целесообразность применения в ограждающих конструкциях кузова. Установлено, что пенополиуретан и экструдированный пенополистирол являются основными материалами для теплоизоляции стен, крыш и полов изотермических вагонов благодаря оптимальному сочетанию низкой теплопроводности, механической прочности и влагостойкости. Показано, что применение вакуумных изоляционных панелей позволяет существенно уменьшить толщину ограждающих конструкций и увеличить полезный объем грузового помещения до 10 % при сохранении внешних габаритов вагона. **Практическая значимость:** разработанные рекомендации по выбору теплоизоляционных материалов могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих изотермических вагонов для повышения эффективности перевозок скоропортящихся грузов. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору изоляции с учетом баланса между теплотехнической эффективностью, долговечностью и экономическими затратами, что способствует снижению потерь при перевозке продукции и продлению срока службы подвижного состава.

Ключевые слова: изотермический подвижной состав, рефрижераторный вагон, вагон-термос, теплоизоляционные материалы, коэффициент теплопроводности, теплоизоляция кузова

Изотермический подвижной состав предназначен для перевозки скоропортящихся грузов с обеспечением стабильного температурного режима в течение всего периода транспортировки. Поддержание заданной температуры достигается за счет применения эффективных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях кузова (стены, пол, крыша), что позволяет минимизировать теплоперенос между внутренним объемом вагона и окружающей средой [1].

Теплоизоляция в изотермическом подвижном составе должна обеспечивать не только низкую теплопроводность, но и устойчивость к вибрациям, влаге, механическим нагрузкам, температурным перепадам и требованиям пожарной безопасности [2]. Учет этих требований является определяющим при выборе конкретного типа изоляции для различных узлов вагона. Структура теплоизоляционного материала (закрытоячеистая или волокнистая) существенно влияет на его эксплуатационные свойства и долговечность [3].

Развитие конструкций изотермических вагонов сопровождалось эволюцией применяемых материалов — от простых волокнистых теплоизоляторов к современным высокоэффективным полимерным и вакуумным панелям. В настоящей работе проведен анализ основных видов теплоизоляционных материалов, их свойств и целесообразности применения в конструкции изотермического подвижного состава.

Материалы, применявшиеся в первых изотермических вагонах

На ранних этапах развития изотермического подвижного состава использовались преимущественно волокнистые и пористые материалы, такие как минеральная вата, базальтовое волокно и карбамидно-формальдегидные пенопласты.

Минеральная вата использовалась в виде матов или плитных теплоизоляторов с относительно низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью. Однако ее высокая гигроскопичность, способность к уплотнению, а также необходимость пароизоляции ограничивали эффективность в условиях транспортной эксплуатации [4].

Базальтовое волокно (каменная вата) отличалось от минеральной ваты еще более высокой огнестойкостью и звукоизоляционными свойствами, но также требовало защиты от влаги и обладало значительной плотностью, что увеличивало массу конструкции [4].

Карбамидно-формальдегидные пенопласты, такие как мипора, применялись в виде легких заливных утеплителей. Более современным вариантом этих материалов является пеноизол, который демонстрировал удовлетворительные теплоизоляционные свойства, но его высокая гигроскопичность, склонность к усадке, невысокая механическая прочность под вибрациями ограничивали его применение в изотермических вагонах и контейнерах [5].

Современные основные теплоизоляционные материалы

В современных ограждающих конструкциях изотермических вагонов доминируют полимерные материалы с закрытой ячеистой структурой, обладающие высокой эффективностью и эксплуатационной стабильностью.

Пенополиуретан (PUR) остается одним из основных теплоизоляционных материалов благодаря низкой теплопроводности, малой плотности и высокой меха-

нической прочности. Его закрытоячеистая структура обеспечивает минимальное водопоглощение и устойчивость к вибрациям, что важно для подвижного состава [6]. Использование пенополиуретана наряду с новыми техническими решениями позволяет создавать новые эффективные вагоны-термосы [7].

Экструдированный пенополистирол (XPS) отличается высокой долговечностью, низким водопоглощением и достаточной механической прочностью. Он широко применяется в сэндвич-панелях стен, крыш и полов, особенно при необходимости обеспечения стабильной теплоизоляции на длительный срок [3].

Пенополистирол (EPS) является доступным и технологичным материалом с низкой плотностью и простотой обработки, однако он уступает XPS по механической прочности и влагостойкости, поэтому чаще применяется в облегченных конструкциях [3].

Материалы ограниченного и перспективного применения

Помимо основных, ранее перечисленных решений, в конструкции изотермических кузовов могут использоваться другие материалы в узких или вспомогательных функциях.

Пеностекло — жесткий материал с хорошей влагонепроницаемостью и прочностью, что делает его перспективным для отдельных участков конструкции с высокими механическими нагрузками. Однако его высокая плотность и стоимость ограничивают широкое применение [4].

Эковата — экологичный целлюлозный утеплитель с хорошими звукоизоляционными свойствами. Однако ее склонность к усадке и высокая гигроскопичность требуют надежной влагозащиты, что затрудняет применение в условиях динамической эксплуатации железнодорожного транспорта [4].

Вспененный полиэтилен, который представляет собой закрытоячеистый полимерный материал, обладает низким водопоглощением, высокой химической стойкостью и улучшенными вибродемпфирующими свойствами, что делает его полезным в качестве дополнительного теплоизоляционного и демпфирующего слоя в узлах ограждающих конструкций [8]. Однако его невысокая прочность на сжатие и ограниченная температурная стойкость не позволяют применять его в качестве основного теплоизоляционного слоя в изотермических вагонах.

Вакуумные изоляционные панели (ВИП) представляют собой высокотехнологичные элементы с крайне низким коэффициентом теплопроводности, что обеспечивает максимальную теплоизоляционную эффективность при минимальной толщине слоя [9]. Применение ВИП особенно актуально в условиях ограниченного объема или при необходимости повысить теплоизоляционные характеристики без увеличения массы и габаритов конструкции. Ограничениями являются высокая стоимость и чувствительность к механическим повреждениям (нарушение вакуума приводит к потере эффективности).

Свойства теплоизоляционных материалов (коэффициент теплопроводности и плотность), используемых в изотермическом подвижном составе, приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Параметр	
	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град)	Плотность ρ , кг/м ³
Минеральная вата	0,030–0,048	30–200
Базальтовое волокно	0,044–0,050	40–180
Мипора	0,028–0,038	10–20
Пеноизол	0,030–0,040	8–18
Пенополиуретан (PUR)	0,019–0,030	30–45
Экструдированный пенополистирол (XPS)	0,032–0,042	28–45
Пенополистирол (EPS)	0,031–0,038	15–25
Пеностекло	0,040–0,080	120–200
Эковата	0,036–0,045	30–70
Вспененный полиэтилен	0,031–0,055	25–50
Вакуумные изоляционные панели	0,0015–0,008	150–250

Для обеспечения необходимого коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции изотермического вагона, равного $K = 0,4$ Вт/(м·град) для изотермического транспортного средства с усиленной изоляцией и $K = 0,7$ Вт/(м·град) с нормальной изоляцией, проведен расчет необходимых толщин [10]. Коэффициент теплопередачи определялся для кузова изотермического вагона, который моделировался в виде идеализированной многослойной стенки, включающей внутреннюю обшивку, теплоизоляционный слой и наружную обшивку.

Коэффициент теплопередачи для идеализированной многослойной стенки определяется на основе суммарного термического сопротивления:

$$K = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \alpha_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{н}}$ — сопротивления теплоотдаче с внутренней и наружной поверхностей ограждения, м²·град/Вт;

δ_i — толщина i -го слоя, м;

λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя, Вт/(м·град);

n — число слоев конструкции.

Для приближенной оценки влияния неучтенных тепловых мостов и конструктивных элементов в упрощенном расчете вводится эмпирический поправочный коэффициент:

$$K_{\text{упр}} = \varphi \cdot K, \quad (2)$$

где φ — поправочный коэффициент, учитывающий конструктивную неоднородность ограждения, $\varphi = 1,5$.

Общий коэффициент ограждающей конструкции определялся по формуле:

$$K_{\text{об}} = \frac{\sum K \cdot F_{\text{ср}}}{F_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{ср}}$ — средняя площадь поверхности теплопередачи ограждающей конструкции, м^2 .

После подстановки данных табл. 1 были определены необходимые толщины для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции изотермического подвижного состава: $K = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ и $K = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Результаты приведены на рис. 1 и 2.

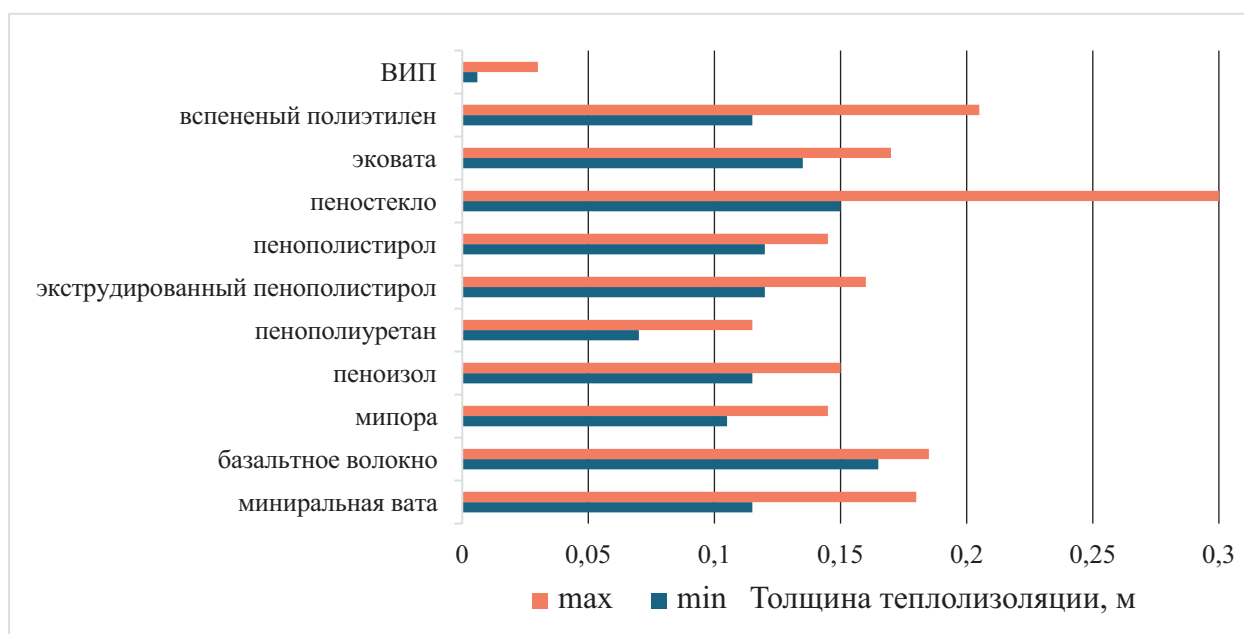


Рис. 1. Необходимая толщина изоляционного материала для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции ИПС с усиленной изоляцией:

$$K = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$$

Из представленных диаграмм следует, что применение вакуумных изоляционных панелей по сравнению с основными традиционными изоляционными материалами (пенополиуретан, пенополистирол) позволяет значительно уменьшить минимальную необходимую толщину ограждающей конструкции изотермического

вагона. За счет сверхнизкого коэффициента теплопроводности вакуумных панелей (~ 5–10 раз ниже, чем у пенополиуретана) требуемая толщина теплоизоляции сокращается в несколько раз. Как следствие, внутренний полезный объем грузового помещения может быть увеличен до 10% при неизменных внешних габаритах вагона.

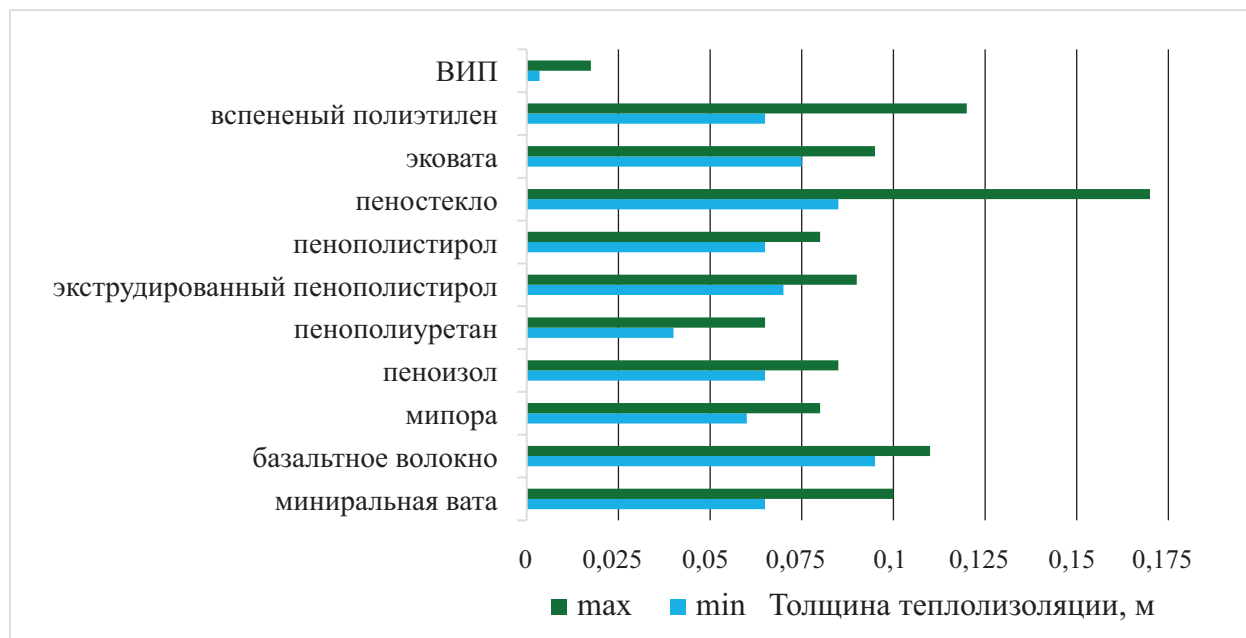


Рис. 2. Необходимая толщина изоляционного материала для обеспечения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции ИПС с нормальной изоляцией:

$$K = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$$

Заключение

Проведенный в статье анализ теплоизоляционных материалов, применяемых в конструкции изотермического подвижного состава, позволяет сделать ряд обобщающих выводов:

1. *Оценка традиционных материалов.* Исторически наиболее доступные и широко распространенные решения (минеральная вата, мипора, пеноизол) сегодня заметно уступают современным полимерным материалам по совокупности эксплуатационных показателей. Основные недостатки этих материалов: сравнительно высокая теплопроводность, склонность к гигроскопии и накоплению влаги, что приводит к резкому снижению термоизолирующих свойств, а также подверженность усадке и слеживанию в процессе длительной эксплуатации под воздействием вибраций. Все это требует увеличения толщины изоляционного слоя, что неизбежно сокращает полезный объем грузового помещения.

2. *Современные базовые материалы.* На сегодняшний день пенополиуретан (в том числе жесткий вспененный) и экструдированный пенополистирол являются основными материалами для теплоизоляции стен, крыш и полов изотермических вагонов. Их широкое применение обусловлено удачным сочетанием ключевых

свойств: низкая теплопроводность, достаточная влагостойкость, а также технологичность монтажа и относительно невысокая стоимость. Эти материалы обеспечивают стабильную термозащиту в течение всего нормативного срока службы вагона при соблюдении правил эксплуатации.

3. *Материалы ограниченного применения.* Пеностекло, эковата, вспененный полиэтилен и подобные им изоляторы находят свое место скорее в узловых конструкциях и вспомогательных функциях, чем в качестве основного сплошного теплоизоляционного слоя. Пеностекло, обладая высокой жесткостью и нулевым водопоглощением, может эффективно применяться в зонах повышенных механических нагрузок и в местах, где требуется абсолютная несжимаемость. Эковата благодаря сыпучести удобна для заполнения труднодоступных полостей и сложных геометрических форм. Вспененный полиэтилен используется как демпфирующая и пароизоляционная подложка. Однако ни один из этих материалов самостоятельно не способен обеспечить требуемое термическое сопротивление ограждающих конструкций вагона в полном объеме.

4. *Перспективное направление.* Наиболее перспективным направлением развития теплоизоляции для изотермического подвижного состава являются вакуумные изоляционные панели (ВИП). Они обеспечивают максимальные теплоизоляционные характеристики — эффективная теплопроводность составляет от 0,0015 до 0,008 Вт/(м·К), что примерно в 5–10 раз ниже, чем у пенополиуретана. Применение ВИП позволяет либо при той же толщине изоляции значительно повысить термостойкость вагона, либо при сохранении требуемого термического сопротивления уменьшить толщину стенок и увеличить полезный объем грузового помещения до 10%.

Вместе с тем широкое внедрение вакуумных панелей сдерживается рядом нерешенных проблем. Это прежде всего высокая стоимость как самих панелей, так и их замены в случае повреждения. Кроме того, остаются открытыми вопросы долговременной герметичности оболочки и сохранения глубокого вакуума внутри панели в условиях реальной эксплуатации (вибрации, удары, циклические перепады температур, возможные механические повреждения). Требуются дальнейшие исследования и технологические разработки, направленные на повышение ударопрочности, снижение стоимости и обеспечение сохранения вакуумных свойств в течение всего жизненного цикла вагона (не менее 15–20 лет).

Таким образом, современный уровень развития теплоизоляционных материалов позволяет проектировать изотермические вагоны с высокими эксплуатационными характеристиками. Выбор конкретного материала должен определяться технико-экономическим обоснованием с учетом типа перевозимых грузов, климатических условий эксплуатации и требуемого срока службы подвижного состава. При этом наиболее интенсивное развитие в ближайшие годы ожидается именно в области вакуумных изоляционных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахматов Х. А. Оценка тепловых ограждений кузова изотермического подвижного состава // Молодой ученый, 2022. №24(419). С. 118–121. EDN MDWUAS
2. Бороненко Ю. П., Абдуллаев Б. А. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, №4. С. 498–513. DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513. EDN PBCJSF
3. Research and Application Progress of Insulation Materials in Cold Chain Logistics / Y. Dong [et al.] // Academic Journal of Science and Technology. 2023. Vol. 8, no. 2. Pp. 104–110. DOI: 10.54097/ajst.v8i2.15049
4. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АСВ, 2006. 256 с.
5. Селиванов Ю. Т. Карбамидно-формальдегидные пенопласты (пеноизол): свойства и применение // Строительные материалы. 2012. №5. С. 18–22.
6. Cui G., Wang X. Engineering Application and Study on Polyurethane-Corrugated Steel Plate Insulation Lining of Existing Railway Tunnel in Seasonal Frozen Area // Science Progress. 2021. Vol. 104, no. 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1177/0036850420987043
7. Буриков С. В., Цыганская Л. В. Выбор технических решений, ограждающих конструкции вагонов-термосов при проектировании // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. №3(99). С. 64–71. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_64. EDN FAPXMX
8. Горелик П. И., Золотова Ю. С. Современные теплоизоляционные материалы и особенности их применения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №3(18). С. 93–103.
9. Verma S., Singh H. Vacuum Insulation in Cold Chain Equipment: A Review // Energy Procedia. 2019. Vol. 161. Pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.082
10. 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 поступления: 27.02.2026

Решение о публикации: 29.04.2026

Контактная информация:

БУРИКОВ Сергей Витальевич — аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», начальник отдела прочностных расчетов; b.s.v.3479@gmail.com

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валерьевна — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», заместитель генерального директора — главный конструктор; tcyganskaya@gmail.com

Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock

S. V. Burikov^{1,2}, L. V. Tsyganskaya^{1,2}

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

² JSC "Scientific and Innovation Center "Vagon", 22m Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Burikov S. V., Tsyganskaya L. V. Thermal Insulation Materials in the Design of Isothermal Rolling Stock // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 43–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-43-52 (In Russian)*

Abstract

The article provides a review of thermal insulation materials and a calculated assessment of the required thickness of thermal insulation used in the design of isothermal rolling stock intended for the transportation of perishable goods while maintaining a specified temperature regime. **Objective:** systematization and comparative analysis of thermal insulation materials used in the enclosing structures of isothermal wagons, as well as identification of the most effective solutions for ensuring a stable temperature regime during the transportation of perishable goods under various climatic and operational conditions. **Results:** the main types of thermal insulation are analyzed in terms of their thermal conductivity coefficient, physical and mechanical properties, moisture resistance, fire resistance, and operational durability. A comparative description of traditional and modern materials (polyurethane foam, polystyrene foams, mineral wool, foam glass, vacuum insulation panels, etc.) is provided, and their advantages, disadvantages, and feasibility of use in the enclosing structures of the wagon body are determined. It is established that polyurethane foam and extruded polystyrene foam are the main materials for thermal insulation of walls, roofs, and floors of isothermal wagons due to the optimal combination of low thermal conductivity, mechanical strength, and moisture resistance. It is shown that the use of vacuum insulation panels makes it possible to significantly reduce the thickness of enclosing structures and increase the useful volume of the cargo compartment by up to 10 % while maintaining the external dimensions of the wagon. **Practical significance:** the developed recommendations for the selection of thermal insulation materials can be used in the design of new and modernization of existing isothermal wagons to improve the efficiency of perishable goods transportation. The obtained results make it possible to make informed choices of insulation taking into account the balance between thermal efficiency, durability, and economic costs, which helps to reduce losses of transported products and extend the service life of rolling stock.

Keywords: isothermal rolling stock, refrigerated car, thermos car, thermal insulation materials, thermal conductivity coefficient, and body thermal insulation

References

1. Rakhmatov Kh.A. Otsenka teplovykh ograzhdenij kuzova izotermicheskogo podvizhnogo sostava [Assessment of Thermal Fences of the Body of the Isothermal Rolling Stock], *Young Scientist*, 2022, no. 24 (419), pp. 118–121. EDN MDWUAS (In Russian)
2. Boronenko Yu. P., Abdullaev B. A. Eksperimental'nye issledovaniya novykh konstruktivnykh reshenij ograzhdeniya kuzovov refrizheratornykh vagonov i kontejnerov [Experimental Research of New Design Solutions for the Fencing of Refrigerated Carriages and Containers], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 498–513. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513. EDN PBCJSF (In Russian)

3. Dong Y., et al. Research and Application Progress of Insulation Materials in Cold Chain Logistics // *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 104–110. DOI: 10.54097/ajst.v8i2.15049
4. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastej zdanij [Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings], Moscow, IASV, 2006, 256 p. (In Russian)
5. Selivanov Yu. T. Karbamidno-formal'degidnye penoplasty (penoizol): svoystva i primeneniye [Urea-Formaldehyde Foams (Penoizol): Properties and Application], *Construction Materials*, 2012, no. 5, pp. 18–22. (In Russian)
6. Cui G., Wang X. Engineering Application and Study on Polyurethane-Corrupted Steel Plate Insulation Lining of Existing Railway Tunnel in Seasonal Frozen Area, *Science Progress*, 2021, vol. 104, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1177/0036850420987043
7. Burikov S.V., Tsyganskaya L.V. Vybor tekhnicheskikh reshenij, ograzhdayushchikh konstruksii vagonov-termosov pri proektirovanii [The Choice of Technical Solutions Enclosing the Structures of Thermos Wagons During Design], *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport]*, 2025, no. 3 (99), pp. 64–71. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_64. EDN FAPXMX (In Russian)
8. Gorelik P. I., Zolotova Yu. S. Sovremennye teploizolyatsionnye materialy i osobennosti ikh primeneniya [Modern Thermal Insulation Materials and Their Application Features], *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanij i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures]*, 2014, no. 3 (18), pp. 93–103. (In Russian)
9. Verma S., Singh H. Vacuum Insulation in Cold Chain Equipment: A Review, *Energy Procedia*, 2019, vol. 161, pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.082
10. Soglashenie o mezhdunarodnykh perevozkakh skoroportyashchikhsya pishchevykh produktov i o spetsial'nykh transportnykh sredstvakh, prednaznachennykh dlya etikh perevozok (SPS) [Agreement on International Carriage of Perishable Food Products and on Special Vehicles for Such Carriage (CFR)], 2024. URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (In Russian)

Received: February 27, 2026

Accepted: April 29, 2026

Author's information:

Sergey V. BURIKOV — Postgraduate Student of the Department “Carriages and Carriage Maintenance”, Head of the Department of Strength Calculations; b.s.v.3479@gmail.com

Lyudmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Carriages and Carriage Maintenance”, Deputy General Director — Chief Designer; tcyganskaya@gmail.com