

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ТЯГА ПОЕЗДОВ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ/RAILWAY ROLLING STOCK, TRAIN TRACTION AND ELECTRIFICATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.67>

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРИМЕНЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И НА ТРАНСПОРТЕ

Обзор

Балалаев А.Н.^{1,*}, Паренюк М.А.²

¹ORCID : 0000-0003-0839-6858;

²ORCID : 0000-0001-9965-1310;

^{1,2} Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (wagon.samgaps[at]mail.ru)

Аннотация

Теплоизоляция играет ключевую роль в обеспечении энергосбережения при соблюдении санитарно-технических норм в части температурного режима в жилых и общественных зданиях, а также комфорта и сохранности грузов и пассажиров на транспортных средствах, особенно на железнодорожном транспорте. Основная задача теплоизоляции — минимизировать тепловой поток через стены жилых и общественных зданий или стенки транспортного средства, вызванный разностью температур между внутренней и внешней средой. Однако для транспортных средств к теплоизоляции предъявляются дополнительные требования по экологической и пожарной безопасности, минимизации массы и объема. В настоящее время актуальными задачами в строительстве и на транспорте являются импортозамещение и энергосбережение, которые можно решить при использовании новых инновационных материалов. В работе ставится цель выполнить анализ мировых тенденций в области применения новых теплоизоляционных материалов, а также анализ следования этим тенденциям в Российской Федерации. В данном обзоре рассматриваются инновационные типы и материалы теплоизоляции, применяемые в строительстве и на транспорте, в частности, в ограждении кузовов подвижного состава.

Ключевые слова: жидкие теплоизоляционные материалы, аэрогель, вакуумные теплоизоляционные панели, теплоизоляционные материалы с фазовым переходом, теплоизоляция подвижного состава.

MAIN TENDENCIES IN THE USE OF MODERN THERMAL INSULATION MATERIALS IN CONSTRUCTION AND TRANSPORT

Review article

Balalaev A.N.^{1,*}, Parenyuk M.A.²

¹ORCID : 0000-0003-0839-6858;

²ORCID : 0000-0001-9965-1310;

^{1,2} Volga State Transport University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (wagon.samgaps[at]mail.ru)

Abstract

Thermal insulation plays a key role in ensuring energy savings while complying with sanitary and technical standards for temperature control in residential and public buildings, as well as comfort and safety for cargo and passengers in vehicles, especially in rail transport. The main task of thermal insulation is to minimise heat flow through the walls of residential and public buildings or the walls of vehicles caused by the temperature difference between the internal and external environments. However, for vehicles, additional requirements are imposed on thermal insulation in terms of environmental and fire safety, minimisation of weight and volume. Currently, the pressing issues in construction and transport are import substitution and energy conservation, which can be addressed through the use of new innovative materials. The aim of this work is to analyse global tendencies in the application of new thermal insulation materials, as well as to analyse the adherence to these tendencies in the Russian Federation. This review examines innovative types and materials of thermal insulation used in construction and transport, in particular, in the insulation of rolling stock bodies.

Keywords: liquid thermal insulation materials, aerogel, vacuum thermal insulation panels, phase change thermal insulation materials, thermal insulation for rolling stock.

Введение

Назначение теплоизоляции состоит в том, что она уменьшает тепловой поток через стенку с теплоизоляцией, вызванный разностью температур двух сред, разделенных этой стенкой и осуществляемый за счет теплопроводности твердых материалов, конвекции в газообразных и (или) жидких средах и излучения. Чем больше толщина теплоизоляции, тем меньше тепловой поток через стенку с теплоизоляцией.

Если стены жилых и общественных зданий обладают теплозащитными свойствами, то при эксплуатации зданий потребуется меньше энергии на обогрев внутренних помещений в зимний период и на кондиционирование в летний период.

На транспортных средствах, в частности на железнодорожном транспорте, теплоизоляция необходима, чтобы защитить температурную среду внутри транспортного средства от воздействия температуры окружающей среды. Таким образом, назначение теплоизоляции на транспортном средстве заключается в обеспечении заданного

температурного диапазона внутри транспортного средства при выходе температуры окружающей среды за границы данного диапазона.

В зависимости от толщины теплоизоляции, величины заданного температурного диапазона внутри транспортного средства и величины разности температуры окружающей среды и одной из границ данного диапазона на транспортном средстве либо требуется, либо не требуется наличие теплотехнических устройств, компенсирующих тепловой поток. Данные устройства (тепловыделяющие элементы или охлаждающие устройства) обычно требуют для своей работы затрат энергии. Исключение составляют аккумуляторы тепла или холода, основу которых составляет вещество, меняющее фазовое состояние с выделением или поглощением тепла в определенном температурном диапазоне.

Необходимость иметь на транспортном средстве источник энергии для обеспечения работы тепловыделяющих или охлаждающих устройств увеличивает стоимость перевозки пассажиров или грузов, требующих обеспечения заданного температурного режима.

Увеличение толщины теплоизоляции, с одной стороны, снижает величину энергии, потребной для обеспечения работы тепловыделяющих или охлаждающих устройств на транспортном средстве, с другой стороны, снижает полезный объем транспортного средства и увеличивает стоимость теплоизоляции.

Таким образом, выбор типа, материала и толщины теплоизоляции для транспортного средства позволяет решить следующие задачи: обеспечить заданный диапазон температуры среды внутри транспортного средства при любых возможных температурах окружающей среды; обеспечить минимум затрат на теплоизоляцию на всех этапах жизненного цикла теплоизоляции от изготовления до утилизации, а также затрат на выработку и расход энергии для обеспечения работы тепловыделяющих или охлаждающих устройств.

Актуальность разработки, исследования, производства и внедрения новых теплоизоляционных материалов постоянно подчеркивается в руководящих документах холдинга ОАО «РЖД», например, в «Энергетической стратегии» — см. [1, С. 21].

Курс на импортозамещение, взятый в нашей стране, требует разработки отечественных высокоэффективных теплоизоляционных материалов с учетом всего мирового опыта, что делает составление обзоров по таким материалам актуальной задачей.

Для нетягового подвижного состава Д.М. Тимкиным был составлен обзор средств тепловой защиты кузовов, включающий анализ 67 источников [2]. Основным выводом данного обзора состоял в том, что перспективным направлением в тепловой изоляции кузовов пассажирских вагонов является использование в конструкции кузова вакуумных теплоизоляционных панелей. Однако, за последние несколько лет в строительной сфере появились новые инновационные материалы, обладающие повышенными теплоизоляционными свойствами — это материалы на основе аэрогелей, жидкие теплоизоляционные материалы, теплоизоляционные материалы с фазовым переходом [3]. Для транспортной отрасли представляет интерес вопрос: можно ли использовать данные материалы в качестве теплоизоляции стенок транспортных средств?

Целью данной статьи является выполнение обзора инновационных типов и материалов теплоизоляции, используемых при строительстве зданий и на транспортных средствах.

Необходимость такого обзора диктуется появлением новых мировых тенденций в области теплоизоляционных материалов и задач, стоящих в настоящее время перед экономикой Российской Федерации, а именно, импортозамещения и энергосбережения.

Несмотря на большое количество таких обзоров и в России, и за рубежом, в этих обзорах не производился анализ динамики публикаций, посвященных инновационным типам теплоизоляции.

Основная задача данного обзора литературы по теплоизоляции состоит в том, чтобы сравнить динамику публикаций по конкретному типу теплоизоляции в зарубежной научной литературе и в Российской научной литературе.

Инструменты и методы исследования литературных источников по инновационным типам теплоизоляции

В качестве базы зарубежных научных источников использовалась платформа ScienceDirect научного издательства Elsevier, в качестве базы отечественных научных источников использовалась научная электронная библиотека eLibrary.

В данных базах по ключевым полям, представляющим названия инновационных типов теплоизоляции, осуществлялся поиск научной литературы за 5 лет с 2020 г. по 2024 г. При этом фиксировалась доля публикаций по каждому типу теплоизоляции по годам, что показывало изменение интереса исследователей к конкретному типу теплоизоляции.

Ключевые поля были выбраны из различных обзоров, в которых были описаны так называемые «суперизоляционные материалы» (SIMs), такие как аэрогель, вакуумные изоляционные панели (VIP) [3], материалы с фазовым переходом (PCMs) [4], жидкие теплоизоляционные покрытия [5].

Динамика публикаций по конкретному типу теплоизоляции рассчитывалась следующим образом. По выбранной базе источников сначала определялось количество публикаций за каждый год из диапазона с 2020 г. по 2024 г. по всем ключевым полям всех рассматриваемых типов теплоизоляции N_i . Затем определялось количество публикаций за каждый год из этого же диапазона по ключевым полям одного типа теплоизоляции n_i . Рассчитывались относительные доли публикаций каждого типа теплоизоляции n_i/N_i и средний показатель динамики публикационной активности по формуле:

$$D = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{\left(\frac{n_{i+1}}{N_{i+1}} - \frac{n_i}{N_i} \right)}{\frac{n_i}{N_i}} \right], \quad (1)$$

где k — число лет временного диапазона.

Следует отметить, что средний показатель динамики публикационной активности, рассчитываемый по формуле (1), является качественным показателем, так как может содержать значительную погрешность из-за того, что множество публикаций описывают несколько типов теплоизоляции и могут учитываться в нескольких списках с количеством n_i .

Для повышения точности анализа динамики публикационной активности можно было бы дополнить приведенный анализ качественными методами, например, экспертной оценкой или тематическим кодированием, однако данные методы сопряжены с затратами времени и ресурсов и обычно проводятся при проведении заказных обзоров (по гранту или по договору).

Результаты исследования литературных источников по инновационным типам теплоизоляции

Результаты определения количества публикаций по инновационным типам теплоизоляции из базы зарубежных научных источников ScienceDirect представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Количество публикаций по инновационным типам теплоизоляции, относительные доли публикаций и показатель публикационной активности каждого типа теплоизоляции на ScienceDirect

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.67.1>

Тип теплоизоляции	Год выхода публикации i					Средний показатель динамики публикационной активности D
	2020	2021	2022	2023	2024	
Все типы N_i	13400	15797	18036	19726	24989	-
Жидкая теплоизоляция $n_{1i}, (n_{1i}/N_i)$	4931 (0,368)	6115 (0,387)	7269 (0,403)	8089 (0,41)	10812 (0,433)	0,04142
Материалы с фазовым переходом $n_{2i}, (n_{2i}/N_i)$	3182 (0,237)	3974 (0,252)	5075 (0,281)	5887 (0,298)	9441 (0,378)	0,126118
Вакуумные теплоизоляционные панели $n_{3i}, (n_{3i}/N_i)$	718 (0,054)	918 (0,058)	1034 (0,057)	1028 (0,052)	1469 (0,059)	0,027032
Аэрогели $n_{4i}, (n_{4i}/N_i)$	597 (0,045)	842 (0,053)	1181 (0,065)	1353 (0,069)	2061 (0,082)	0,168704

Как видно из таблицы 1, в зарубежной базе научных публикаций ScienceDirect по всем инновационным типам теплоизоляции наблюдается положительная динамика публикационной активности, наибольшие показатели динамики публикационной активности составили научные публикации по типам теплоизоляции: материалы с фазовыми переходами и аэрогели.

Результаты определения количества публикаций по инновационным типам теплоизоляции из Российской базы научных публикаций eLibrary представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Количество публикаций по инновационным типам теплоизоляции, относительные доли публикаций и показатель публикационной активности каждого типа теплоизоляции в eLibrary

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.67.2>

Тип теплоизоляции	Год выхода публикации					Средний показатель динамики публикационной активности D
	2020	2021	2022	2023	2024	
Все типы N_i	553	568	535	584	530	-
Жидкая теплоизоляция $n_{1i}, (n_{1i}/N_i)$	13 (0,024)	12 (0,021)	15 (0,028)	10 (0,017)	5 (0,009)	-0,15313
Материалы с фазовым переходом n_{2i}	1 (0,002)	1 (0,002)	2 (0,004)	2 (0,003)	0 (0)	0,003263

Тип теплоизоляции	Год выхода публикации					Средний показатель
	2020	2021	2022	2023	2024	
(n_{2i}/N_i)						
Вакуумные теплоизоляционные панели $n_{3i} (n_{3i}/N_i)$	9 (0,016)	3 (0,005)	5 (0,009)	11 (0,019)	4 (0,008)	0,127524
Аэрогели $n_{4i} (n_{4i}/N_i)$	1 (0,002)	5 (0,009)	5 (0,009)	6 (0,01)	8 (0,015)	1,124534

Как видно из таблицы 2, положительная динамика публикационной активности наблюдается в Российской базе научных публикаций по таким инновационным типам теплоизоляции, как аэрогели, вакуумные теплоизоляционные панели и материалы с фазовыми переходами, наибольший показатель динамики публикационной активности составили научные публикации по аэрогелям и вакуумным теплоизоляционным панелям.

Обзор научных публикаций по типу теплоизоляции «жидкая теплоизоляция»

Жидкие теплоизоляционные материалы представляют собой композицию керамических вакуумированных микросфер (наносфер) в водном растворе акриловых полимеров (акриловой краске) [6]. При нанесении такой краски на твердую поверхность она высыхает, образуя тонкий слой теплоизоляции. Теплопроводность этого слоя тем ниже, чем больше вакуумированных микросфер приходится на единицу поверхности. В работе [6] были представлены результаты экспериментального определения среднего коэффициента теплопроводности термоласки марки «Изолат-02» толщиной 7,5 мм, его значение составило 0,057 Вт/(м·К).

В работе [7] исследовалась зависимость теплозащитных свойств термоласки от толщины покрытия.

Большие споры в научной среде вызвали методы определения теплозащитных свойств жидких теплоизоляционных материалов, что было отражено в работе [8], где также представлена оригинальная методика определения коэффициента теплопроводности жидкой тепловой изоляции.

В англоязычной литературе данные вопросы отражались в работе [9], где рассматривались многочисленные факторы, влияющие на теплофизические характеристики термоласки, включая методы синтеза, стабильность наносфер, различные связующие жидкости, тип, размер, форму, модификацию поверхности и объемную долю вакуумированных наночастиц.

Вопросы экономического обоснования использования термоласки на железнодорожных цистернах рассматривались в работе [10].

По данному типу теплоизоляции можно сделать вывод, исходя из анализа публикаций, что потенциал использования термоласки высок в тех областях, где отсутствует техническая возможность использования теплоизоляции большой толщины — это наружные трубопроводы, резервуары для хранения нефтепродуктов, железнодорожные цистерны.

Обзор научных публикаций по типу теплоизоляции «материалы с фазовыми переходами»

В работе [11] выполнен анализ перспектив применения материалов с фазовыми переходами (МФП) в ограждениях строительных конструкций, авторами рассчитан энергетический и экономический эффект от применения МФП в строительных конструкциях, составляющий от 2 до 13 % и зависящий как от типа материала, так и от региона применения.

В работе [12] представлена математическая модель теплообмена в ограждении строительной конструкции, включающей термоаккумулирующий материал на основе парафинов. В некотором диапазоне температур в данном материале происходит фазовый переход из жидкости в твердое состояние с выделением тепла или из твердого состояния в жидкое с поглощением тепла, что снижает затраты энергии на кондиционирование жилого помещения аналогично действию теплоизоляции.

В работе [13] описан гибридный материал с улучшенной теплоизоляцией, аккумулярованием энергии, механической прочностью и водостойкостью, полученный с использованием лигноцеллюлозы в качестве пористого носителя и полиэтиленгликоля в качестве материала с фазовым переходом. Данный материал обладает скрытой теплотой фазового перехода 110-123 Дж/г и теплопроводностью в пределах 0,037–0,042 Вт/(м·К). Этот гибридный материал не пропускает воду во время фазовых переходов и имеет регулируемый диапазон температуры фазовых переходов.

В работе [14] выполнен анализ экономической целесообразности использования наряду с обычными теплоизоляционными материалами в строительных конструкциях материалов с фазовыми переходами. Было показано, что экономия электроэнергии на отопление зданий составляет от 43 до 99 %, а на охлаждение в диапазоне от 38 до 52 %. Авторами определена оптимальная температура для нагревательного термостата, составляющая приблизительно 20 °С, а для охлаждающего термостата — приблизительно 25 °С. Кроме того, наилучшей теплоизоляцией является полиуретан, а материалом с фазовым переходом — BioPCMDSCM27Q21. Толщина теплоизоляции в диапазоне от 6,9 см до 9,8 см выбрана как оптимальная, а толщина материала с фазовым переходом составляет примерно 5 см.

На железнодорожном транспорте материалы с фазовым переходом используются для термостабилизации тепловоза в зимний период с целью сокращения энергетических затрат на предпусковой прогрев дизеля [15].

Обзор научных публикаций по типу теплоизоляции «вакуумные теплоизоляционные панели»

В работе [16] проведен сравнительный анализ технических характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей (ВИП). Рассмотрены вакуумные панели с различными видами наполнителей, повышающим прочностные свойства панелей. Подобные ВИП предложены в качестве высокоэффективной тонкостенной теплоизоляции в термokonтейнерах [17], [18].

В работе [19] отмечены недостатки ВИП, заключающиеся в истирании и повреждении из-за температурных расширений оболочки, что со временем повышает давление внутри ВИП и ухудшает эксплуатационные характеристики. Для устранения этих недостатков в [19] предложено на внешнюю поверхность ВИП-оболочки наносить защитный слой из минеральной ваты.

В работе [20] исследовался срок службы ВИП в различных суровых условиях и анализировались перспективы их продвижение на строительном рынке Китайской народной республики.

На железнодорожном транспорте ВИП предлагалось использовать не только как теплоизоляцию, но и как конструкционный материал в ограждении кузова пассажирского вагона [21] или кузова изотермического вагона [22]. Также в качестве теплоизоляции предлагалось использовать ВИП в конструкции бункера для железнодорожных перевозок битума [23] и в конструкции котла цистерны для перевозки химических грузов [24].

Обзор научных публикаций по типу теплоизоляции «аэрогели»

В работе [25] представлен обзор теплоизоляционных материалов, предназначенных для защиты как от высоких, так и от низких температур, с использованием аэрогелей, представляющих собой твердое вещество, например, диоксид кремния с низкой плотностью и большим количеством пор, заполненных воздухом или газом. Аэрогели имеют низкие теплопроводность, коэффициент преломления света, диэлектрическую проницаемость и скорость распространения звука.

В работе [26] представлены результаты исследований теплофизических характеристик рулонного теплоизоляционного материала на основе аэрогеля диоксида кремния серии DRT06-Z производства Alison Aerogel, в частности результаты измерения коэффициента теплопроводности в диапазоне температуры от 10 до 650 °C.

В работе [27] предложен метод изготовления полиимидных аэрогелей (polyimide aerogel) с функциональной структурой с помощью 3D-печати, расширяющий их применение в области звукопоглощения и теплоизоляции.

В обзоре [28] приведены сведения о гибридном пенопласте, полученном из обработанных кислотой арамидных нановолокон (wANFA) и нановолокон целлюлозы (CNF) с содержанием арамидных нановолокон до 40%, обладающим высокой термостойкостью и теплопроводностью в диапазоне 0,018-0,023 Вт/(м×К).

В работе [29] приведены сведения о теплоизоляционных свойствах различных аэрогелей, в том числе изготовленных на органической основе. Например, для аэрогеля на основе резорцинол формальдегида значение коэффициента теплопроводности, по данным [29], составляет 0,012 Вт/(м×К), на основе полиуретана – 0,022 Вт/(м×К).

На железнодорожном транспорте аэрогели нашли применение в составе теплоизоляции контейнер-цистерны [30]. Необходимость использования аэрогеля авторы объясняли необходимостью повышения гидрофобности существующей теплоизоляции из стекловолокна. Для этого внутренний слой, примыкающий к котлу, выполнен из материала, представляющего собой композицию из базальтового волокна и кремнеземного аэрогеля, а наружный слой теплоизоляции выполнен из стекловолоконных матов. При резком перепаде температур, например, при перемещении контейнера-цистерны с открытого воздуха в отапливаемое производственное помещение, на поверхности котла из влажного воздуха конденсируется вода. Материал, представляющий собой композицию из базальтового волокна и кремнеземного аэрогеля, имеет низкую пористость, чем и объясняется его высокая гидрофобность, он не увлажняется, и, соответственно, не теряет своих теплозащитных свойств [30].

Обсуждение

В литературных источниках часто приводятся данные по теплопроводности новых теплоизоляционных материалов, взятые из рекламных сообщений предприятий – производителей этих материалов, к которым надо относиться с осторожностью. Так, в работе [31] приведены теплоизоляционные характеристики инновационных материалов «КЛИМАЛАН» (значение коэффициента теплопроводности 0,012 Вт/(м×К)), RE-THERM (значение коэффициента теплопроводности 0,0011 Вт/(м×К)).

Получение столь низких значений коэффициента теплопроводности предприятиями — производителями теплоизоляционных материалов можно объяснить, как желанием превзойти конкурентов в рекламе товара, так и несовершенством методики измерения теплофизических величин материалов с ярко выраженной неоднородностью, таких как аэрогели и вакуумные теплоизоляционные панели. Поэтому перед применением новых инновационных материалов необходимо проверить экспериментально их теплоизоляционные характеристики по правильно выбранной методике.

Как пример качественно разработанной методике эксперимента в области исследования электрических параметров можно привести работу [32].

В работе [33] представлена методика и результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности многослойной стенки пассажирского вагона. В описанной методике сочетаются экспериментальные и аналитические методы, а также методы компьютерного моделирования, позволившие сократить время эксперимента с нескольких суток до 40 минут.

Выбор типа теплоизоляции — это многокритериальная оптимизационная задача, в которой должны учитываться стоимость всего жизненного цикла теплоизоляции, полученный с помощью теплозащиты эффект по снижению энергозатрат, массовые и объемные характеристики, возможность объединения нескольких функций, например, функции теплозащиты, звукоизоляции и силовой конструкции.

Как пример выбора типа теплоизоляции для котла цистерны на основе многокритериальной оптимизации можно привести работу [10], в которой учитывались, как теплозащитные свойства термоласки, так и объемные, массовые и стоимостные характеристики, а также свойства ремонтпригодности.

Другим примером обоснования выбора типа теплоизоляции для ограждения пассажирского вагона и метода ее производства является работа [34], в которой обосновывается инвестиционная привлекательность применения вакуумных теплоизоляционных панелей из полиамидных пластин сотовой структуры. В данной работе сравниваются два метода изготовления таких пластин – методом экструзии и методом 3-D печати.

Заклучение

Современные мировые тенденции в применении современных теплоизоляционных материалов в строительстве и на транспорте заключаются в использовании нанотехнологий (жидкие теплоизоляционные материалы), материалов с фазовыми переходами, вакуумных теплоизоляционных панелей и аэрогелей.

В зарубежной базе научных публикаций ScienceDirect по всем перечисленным типам теплоизоляции наблюдается положительная динамика публикационной активности, наибольшие показатели динамики публикационной активности составили научные публикации по типам теплоизоляции: материалы с фазовыми переходами и аэрогели.

В Российской базе научных публикаций eLibrary положительная динамика публикационной активности наблюдается по таким типам теплоизоляции, как аэрогели и вакуумные теплоизоляционные панели.

В работе выполнен обзор зарубежных и отечественных научных статей по инновационным типам и материалам теплоизоляции, применяемым в строительстве и на транспорте, в частности, в ограждении кузовов подвижного состава. Установлено, что в Российской базе научных публикаций eLibrary отмечается значительное число публикаций по использованию вакуумных теплоизоляционных панелей в ограждении кузовов грузовых и пассажирских вагонов. Анализ источников позволяет также рекомендовать использование аэрогелей для тепловой защиты железнодорожных цистерн и материалов с фазовыми переходами для термостабилизации тепловозов в зимний период с целью сокращения энергетических затрат на предпусковой прогрев дизеля. Также рекомендуется использовать вакуумную теплоизоляцию для пассажирских и изотермических вагонов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Нуриев М.Г., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.67.3>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Nuriev M.G., Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.67.3>

Список литературы / References

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» № 2718р от 15 декабря 2011 г. — Москва : ОАО «РЖД», 2011. — 97 с.
2. Тимкин Д.М. Сравнительный анализ средств тепловой защиты кузовов нетягового подвижного состава / Д.М. Тимкин. — Самара : СамГУПС, 2019. — 31 с. — Библиогр.: 67 назв. — Деп. в ВИНТИ РАН 18.07.2019 № 56-B2019.
3. Lakatos Á. Thermal performances of Super Insulation Materials (SIMs): A comprehensive analysis of characteristics, heat transfer mechanisms, laboratory tests, and experimental comparisons / Á. Lakatos, E. Lucchi // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2024. — Vol. 152. — 107293 p. — DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107293.
4. Khudhair A.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials / A.M. Khudhair, M.M. Farid // Energy Conversion and Management. — 2004. — Vol. 45. — № 2. — P. 263–275. — DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00131-6.
5. Маткаримов Ш.А. Определение жидких теплоизоляционных покрытий и их коэффициента теплопроводности / Ш.А. Маткаримов, Б.Т. Тожибоев // Проблемы устойчивости развития социально-экономических систем : материалы Международной научно-практической конференции. — Тамбов : Издательский дом «Державинский», 2021. — С. 299–306.
6. Байков И.Р. Исследование свойств жидких керамических теплоизоляционных материалов / И.Р. Байков, О.В. Смородова, С.В. Китаев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 106–121. — DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-5-106-121. — EDN YNHEHB.
7. Нефедов А.А. Влияние толщины покрытия на теплозащитные свойства жидкой теплоизоляции / А.А. Нефедов, А.В. Виноградова // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции : в 8 ч. — Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2024. — С. 492–498. — EDN KXSPOA.
8. Павлов М.В. Определение коэффициента теплопроводности жидкой тепловой изоляции в лабораторных условиях / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, А.А. Сеницын [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2014. — № 37 (56). — С. 79–86. — EDN SXXZZZ.

9. Rafiq M. Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation-A review / M. Rafiq, M. Shafique, A. Azam [et al.] // *Ain Shams Engineering Journal*. — 2021. — Vol. 12. — № 1. — P. 555–576. — DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.010.
10. Балалаев А.Н. Оценка эффективности тепловой защиты котла цистерны для перевозки сжиженных газов / А.Н. Балалаев, В.Р. Набиуллин, М.А. Пареньюк // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2018. — № 5 (71). — С. 7–15.
11. Федюхин А.В. Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях / А.В. Федюхин, О.В. Афанасьева, М.Д. Зайцев // *Вестник МГСУ*. — 2023. — Т. 18. — № 12. — С. 1977–1988. — DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988. — EDN QNHTUR.
12. Кудабаяев Р.Б. Математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала / Р.Б. Кудабаяев, А.А. Джумабаев, У.С. Сулейменов [и др.] // *Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии*. — 2022. — № 2 (139). — С. 102–110. — DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. — EDN HMBBLS.
13. Hu X. Scaling up hybrid insulation: Integration of lignocellulose and phase change materials for sustainable thermal management / X. Hu, A. Kankkunen, A. Seppälä [et al.] // *Materials Today Communications*. — 2024. — Vol. 41. — 110281 p. — DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110281.
14. Hamooleh M.B. Multi-objective optimization of energy and thermal comfort using insulation and phase change materials in residential buildings / M.B. Hamooleh, A. Torabi, M. Baghoolizadeh // *Building and Environment*. — 2024. — Vol. 262. — 111774 p. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111774.
15. Габдрафиков Ф.З. Автономная система предпусковой тепловой подготовки дизельных двигателей с использованием веществ фазового перехода / Ф.З. Габдрафиков, Р.Д. Исламгулов // *Инновации в АПК – как стратегические приоритеты технологического суверенитета : материалы II Национальной научно-практической конференции с Международным участием : Ассоциация технологическая платформа «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания»*, 2023. — С. 69–73. — EDN RJHRHM.
16. Долгов И.П. Разработка вакуумных панелей на основе микрокремнезема из наноструктурированного порошка частиц диатомита / И.П. Долгов, Н.Н. Киселев, Л.И. Куприяшкина [и др.] // *Огарёв-Online*. — 2018. — № 9 (114). — 5 с. — EDN XUFGXB.
17. Ахметжанов Р.А. Вакуумно-порошковая теплоизоляция термokonтейнеров / Р.А. Ахметжанов, Л.И. Куприяшкина, О.В. Ляскин [и др.] // *Огарёв-Online*. — 2023. — № 7 (192). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vakuumno-poroshkovaya-teploizolyatsiya-termokonteynernov> (дата обращения: 03.04.2025).
18. Селяев В.П. Применение вакуумных теплоизоляционных панелей в качестве утеплителя термokonтейнеров / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, М.А. Муханов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. — 2022. — № 12 (768). — С. 5–13. — DOI: 10.32683/0536-1052-2022-768-12-5-13. — EDN BRSWNE.
19. Yue J. Research on the design and thermal performance of vacuum insulation panel composite insulation materials / J. Yue, J. Liu, X. Song [et al.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. — 2024. — Vol. 64. — 105437 p. — DOI: 10.1016/j.csite.2024.105437.
20. Kan A. Theoretical prediction and aging experimental verification of the service life of vacuum insulation panels / A. Kan, N. Zheng, Y. Wu [et al.] // *Cleaner Engineering and Technology*. — 2022. — Vol. 8. — 100484 p. — DOI: 10.1016/j.clet.2022.100484.
21. Balalaev A.N. Thermal studies of vacuum panels of cellular structure of a passenger car / A.N. Balalaev, M.A. Parenjuk, D.M. Timkin // *Nexo Revista Científica*. — 2022. — Vol. 36. — № 6. — P. 1707–1713. — DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13133.
22. Balalaev A. Mass and heat-insulation properties of the bodies of passenger and insulated railway cars made of vacuum honeycomb panels / A. Balalaev, M. Parenjuk, I. Arslanov [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. — 2018. — Vol. 16. — № 1. — P. 50–59.
23. Балалаев А.Н. Исследование прочностных и теплоизоляционных свойств моделей вакуумных теплоизоляционных панелей в конструкции бункера для перевозки битума / А.Н. Балалаев, А.В. Рожков // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2018. — № 5 (71). — С. 48–55. — DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.026.
24. Ананников И.О. Исследование модели вакуумного теплоизоляционного кожуха котла цистерны для перевозки химических грузов / И.О. Ананников, А.Н. Балалаев, М.А. Пареньюк // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2018. — № 4 (70). — С. 7–13. — EDN YASAQH.
25. Бабашов В.Г. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) / В.Г. Бабашов, Н.М. Варрик, Т.А. Карасева // *Труды ВИАМ*. — 2019. — № 6 (78). — С. 32–42. — DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-32-42.
26. Пастушков П.П. Исследования теплопроводности рулонных материалов на основе аэрогеля / П.П. Пастушков, С.И. Гутников, Н.В. Павленко [и др.] // *Строительные материалы*. — 2020. — № 6. — С. 39–43. — DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-39-43. — EDN KHOWNJ.
27. Gui Y. 3D printed high-strength polyimide aerogel metamaterials for sound absorption and thermal insulation / Y. Gui, Z. Fei, S. Zhao [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2024. — Vol. 454. — 139145 p. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139145.
28. Qiu P. Ultrafast preparation of aramid nanofibers aerogel for highly efficient thermal insulation and pollutants adsorption / P. Qiu, F. Shi, J. Liu [et al.] // *Applied Materials Today*. — 2025. — Vol. 42. — 102562 p. — DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102562.
29. Сиянов А.И. Исследование применения аэрогелей из кремнезема / А.И. Сиянов, Д.И. Абдулманов // *Construction and Geotechnics*. — 2021. — Т. 12. — № 4. — С. 83–93. — DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.06.

30. Савушкин Р.А. Контейнер-цистерна : пат. 185206 РФ, МПК51 В61D 5/06, F17C 1/12 / Р.А. Савушкин, К.В. Кякк, В.А. Шнек [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «ВНИЦТТ». — № 2018118999; заявл. 2018-05-23; опубл. 2018-11-26. — 5 с.
31. Шаталова А.О. Инновационные теплоизоляционные материалы / А.О. Шаталова, И.А. Сверчков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инновации в строительстве. — 2016. — № 2. — С. 94–98.
32. Гилемханов Т.Ф. Автоматизированный стенд для измерения параметров источников электропитания / Т.Ф. Гилемханов, Р.Ф. Гибадуллин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 10 (148). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.70. — EDN JFISTE.
33. Балалаев А.Н. Результаты экспериментального исследования вакуумной теплоизоляции для пассажирского вагона / А.Н. Балалаев, М.А. Паренюк, Д.М. Тимкин // Вестник транспорта Поволжья. — 2022. — № 1 (91). — С. 7–14. — EDN GVTMAA.
34. Балалаев А.Н. Методика оценки привлекательности инвестиционного проекта внедрения нового типа теплоизоляции пассажирского вагона / А.Н. Балалаев, Д.М. Тимкин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 4–1 (118). — С. 12–19. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.118.4.003.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Energeticheskaya strategiya holdinga "Rossijskie zheleznye dorogi" na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda [Energy strategy of the holding company Russian Railways for the period up to 2015 and for the perspective up to 2030] : rasporyazhenie OAO "RZHD" № 2718r ot 15 dekabrya 2011 g. [Order of JSC Russian Railways № 2718r of December 15, 2011]. — Moscow : OAO "RZHD" [JSC Russian Railways], 2011. — 97 p. [in Russian]
2. Timkin D.M. Sravnitel'nyj analiz sredstv teplovoj zashchity kuzovov netyagovogo podvizhnogo sostava [Comparative analysis of thermal protection of non-traction rolling stock bodies] / D.M. Timkin. — Samara : SamGUPS, 2019. — 31 p. — Bibliogr.: 67 titles. — Dep. v VINITI RAN 18.07.2019 № 56-V2019. [in Russian]
3. Lakatos Á. Thermal performances of Super Insulation Materials (SIMs): A comprehensive analysis of characteristics, heat transfer mechanisms, laboratory tests, and experimental comparisons / Á. Lakatos, E. Lucchi // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2024. — Vol. 152. — 107293 p. — DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107293.
4. Khudhair A.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials / A.M. Khudhair, M.M. Farid // Energy Conversion and Management. — 2004. — Vol. 45. — № 2. — P. 263–275. — DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00131-6.
5. Matkarimov Sh.A. Opredelenie zhidkih teploizolyacionnyh pokrytij i ih koeficienta teploprovodnosti [Liquid Heat Insulating Coating and Determination of Their Heat Conductivity Coefficient] / Sh.A. Matkarimov, B.T. Tozhiboev // Problemy ustojchivosti razvitiya social'no-ehkonomicheskikh sistem [Problems of sustainability of socio-economic systems] : proceedings of the International Scientific and Practical Conference. — Tambov : "Derzhavinsky" Publishing House, 2021. — P. 299–306. [in Russian]
6. Baikov I.R. Issledovanie svojstv zhidkih keramicheskikh teploizolyacionnyh materialov [Investigation of properties of liquid ceramic thermal insulation materials] / I.R. Baikov, O.V. Smorodova, S.V. Kitaev // Nanotekhnologii v stroitel'stve : nauchnyj internet-zhurnal [Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal]. — 2018. — Vol. 10. — № 5. — P. 106–121. — DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-5-106-121. — EDN YNHEHB. [in Russian]
7. Nefedov A.A. Vliyanie tolshhiny pokrytiya na teplozashhitnye svojstva zhidkoj teploizolyacii [Influence of coating thickness on the heat protective properties of liquid thermal insulation] / A.A. Nefedov, A.V. Vinogradova // Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ehkonomiki i trgovli [Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade] : proceedings of the All-Russian Scientific, Practical and Educational Conference : in 8 parts. — Saint Petersburg : Politekh-Press, 2024. — P. 492–498. — EDN KXSPOA. [in Russian]
8. Pavlov M.V. Opredelenie koeficienta teploprovodnosti zhidkoj teplovoj izolyacii v laboratornyh usloviyah [Determination of thermal conductivity factor of liquid heat insulation in the laboratory environment] / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, A.A. Sinicyn [et al.] // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. — 2014. — № 37 (56). — P. 79–86. — EDN SXXZZZ. [in Russian]
9. Rafiq M. Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation-A review / M. Rafiq, M. Shafique, A. Azam [et al.] // Ain Shams Engineering Journal. — 2021. — Vol. 12. — № 1. — P. 555–576. — DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.010.
10. Balalaev A.N. Ocenka effektivnosti teplovoj zashchity kotla cisterny dlya perevozki szhizhennykh gazov [Evaluation of the effectiveness of thermal protection of a tank boiler for the transportation of liquefied gases] / A.N. Balalaev, V.R. Nabiullin, M.A. Parenjuk // Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of transport of the Volga region]. — 2018. — № 5 (71). — P. 7–15. [in Russian]
11. Fedyukhin A.V. Analiz perspektiv primeneniya materialov s fazovym perekhodom v stroitel'nykh konstrukciyah [Analysis of the prospects of phase change materials in building structures] / A.V. Fedyukhin, O.V. Afanaseva, M.D. Zaitsev // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. — 2023. — Vol. 18. — № 12. — P. 1977–1988. — DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988. — EDN QNHTUR. [in Russian]
12. Kudabaev R.B. Matematicheskaya model' teploobmena pri fazovom perekhode teploakkumuliruyushhego materiala [Mathematical model of heat transfers during phase transition of heat storage material] / R.B. Kudabaev, A.A. Dzhumabaev, U.S. Suleimenov [et al.] // Vestnik Evrazijskogo nacional'nogo universiteta imeni L.N. Gumileva. Seriya: Tekhnicheskie nauki

- i tekhnologii [Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Technical Sciences and Technologies]. — 2022. — № 2 (139). — P. 102–110. — DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. — EDN HMBBLS. [in Russian]
13. Hu X. Scaling up hybrid insulation: Integration of lignocellulose and phase change materials for sustainable thermal management / X. Hu, A. Kankkunen, A. Seppälä [et al.] // *Materials Today Communications*. — 2024. — Vol. 41. — 110281 p. — DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110281.
 14. Hamooleh M.B. Multi-objective optimization of energy and thermal comfort using insulation and phase change materials in residential buildings / M.B. Hamooleh, A. Torabi, M. Baghoolizadeh // *Building and Environment*. — 2024. — Vol. 262. — 111774 p. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111774.
 15. Gabdrafikov F.Z. Avtonomnaya sistema predpuskovoy teplovoj podgotovki dizel'nyh dvigatelej s ispol'zovaniem veshhestv fazovogo perekhoda [Autonomous system of pre-start thermal treatment of diesel engines using phase transition substances] / F.Z. Gabdrafikov, R.D. Islamgulov // *Innovacii v APK - kak strategicheskie priority tekhnologicheskogo suvereniteta* [Innovations in agriculture as strategic priorities of technological sovereignty] : proceedings of the II National Scientific and Practical Conference with International Participation. — Voronezh : Association of Technological platform "Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products", 2023. — P. 69–73. — EDN RJHRHM. [in Russian]
 16. Dolgov I.P. Razrabotka vakuumnyh panelej na osnove mikrokremszema iz nanostrukturirovannogo poroshka chastic diatomita [Development of vacuum panels based on microsilica from nanostructured powder particles of diatomite] / I.P. Dolgov, N.N. Kiselev, L.I. Kupriyashkina [et al.] // *Ogarev-Online*. — 2018. — № 9 (114). — 5 p. — EDN XUFGXB. [in Russian]
 17. Ahmetzhanov R.A. Vakuumno-poroshkovaya teploizolyaciya termokontejnerov [Vacuum-powder thermal insulation of thermocontainers] / R.A. Ahmetzhanov, L.I. Kupriyashkina, O.V. Liaskin [et al.] // *Ogarev-Online*. — 2023. — № 7 (192). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vakuumno-poroshkovaya-teploizolyatsiya-termokonteynerov> (accessed: 03.04.2025). [in Russian]
 18. Selyaev V.P. Primenenie vakuumnyh teploizolyacionnyh panelej v kachestve uteplitelya termokontejnerov [Application of vacuum thermal insulation panels as insulation of thermal containers] / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, M.A. Mukhanov [et al.] // *Izvestiya vyssih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. — 2022. — № 12 (768). — P. 5–13. — DOI: 10.32683/0536-1052-2022-768-12-5-13. — EDN BRSWNE. [in Russian]
 19. Yue J. Research on the design and thermal performance of vacuum insulation panel composite insulation materials / J. Yue, J. Liu, X. Song [et al.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. — 2024. — Vol. 64. — 105437 p. — DOI: 10.1016/j.csite.2024.105437.
 20. Kan A. Theoretical prediction and aging experimental verification of the service life of vacuum insulation panels / A. Kan, N. Zheng, Y. Wu [et al.] // *Cleaner Engineering and Technology*. — 2022. — Vol. 8. — 100484 p. — DOI: 10.1016/j.clet.2022.100484.
 21. Balalaev A.N. Thermal studies of vacuum panels of cellular structure of a passenger car / A.N. Balalaev, M.A. Parenjuk, D.M. Timkin // *Nexo Revista Cientifica*. — 2022. — Vol. 36. — № 6. — P. 1707–1713. — DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13133.
 22. Balalaev A. Mass and heat-insulation properties of the bodies of passenger and insulated railway cars made of vacuum honeycomb panels / A. Balalaev, M. Parenjuk, I. Arslanov [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. — 2018. — Vol. 16. — № 1. — P. 50–59.
 23. Balalaev A.N. Issledovanie prochnostnyh i teploizolyacionnyh svojstv modelej vakuumnyh teploizolyacionnyh panelej v konstrukcii bunkera dlya perevozki bituma [Investigation of strength and thermal insulation properties of vacuum heat-insulating panels models in structure of bunker for bitumen transportation] / A.N. Balalaev, A.V. Rozhkov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. — 2018. — № 5 (71). — P. 48–55. — DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.026. [in Russian]
 24. Anannikov I.O. Issledovanie modeli vakuumnogo teploizolyacionnogo kozhuba kotla cisterny dlya perevozki himicheskikh грузов [Investigation of a model of a vacuum thermal insulation casing of a tank boiler for the transportation of chemical goods] / I.O. Anannikov, A.N. Balalaev, M.A. Parenjuk // *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. — 2018. — № 4 (70). — P. 7–13. — EDN YASAQH. [in Russian]
 25. Babashov V.G. Primenenie aerogelej dlya sozdaniya teploizolyacionnyh materialov (obzor) [Application of aerogels for the heat insulation materials (review)] / V.G. Babashov, N.M. Varrik, T.A. Karaseva // *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. — 2019. — № 6 (78). — P. 32–42. — DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-32-42. [in Russian]
 26. Pastushkov P.P. Issledovaniya teploprovodnosti rulonnyh materialov na osnove aerogelya [Investigation of thermal conductivity of rolled materials based on aerogel] / P.P. Pastushkov, S.I. Gutnikov, N.V. Pavlenko [et al.] // *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. — 2020. — № 6. — P. 39–43. — DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-39-43. — EDN KHOWNJ. [in Russian]
 27. Gui Y. 3D printed high-strength polyimide aerogel metamaterials for sound absorption and thermal insulation / Y. Gui, Z. Fei, S. Zhao [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2024. — Vol. 454. — 139145 p. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139145.
 28. Qiu P. Ultrafast preparation of aramid nanofibers aerogel for highly efficient thermal insulation and pollutants adsorption / P. Qiu, F. Shi, J. Liu [et al.] // *Applied Materials Today*. — 2025. — Vol. 42. — 102562 p. — DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102562.
 29. Siyanov A.I. Issledovanie primeneniya aerogelej iz kremnezema [Research on the use of silica aerogels] / A.I. Siyanov, D.I. Abdulmanov // *Construction and Geotechnics*. — 2021. — Vol. 12. — № 4. — P. 83–93. — DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.06. [in Russian]

30. Savushkin R.A. : pat. 185206 Russian Federation, MPK51 B61D 5/06, F17C 1/12. Kontejner-cisterna [Tank container] / R.A. Savushkin, K.V. Kyakk, V.A. Shnek [et al.]; the applicant and the patentee LLC "VNITTT". — № 2018118999; appl. 2018-05-23; publ. 2018-11-26. — 5 p. [in Russian]
31. Shatalova A.O. Innovacionnye teploizolyacionnye materialy [Innovative thermal insulation materials] / A.O. Shatalova, I.A. Sverchkov // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Innovacii v stroitel'stve [Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Innovations in construction]. — 2016. — № 2. — P. 94–98. [in Russian]
32. Gilemkhanov T.F. Avtomatizirovannyj stend dlya izmereniya parametrov istochnikov elektropitaniya [Automated test bench for measuring power supply parameters] / T.F. Gilemkhanov, R.F. Gibadullin // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 10 (148). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.70. — EDN JFISTE. [in Russian]
33. Balalaev A.N. Rezul'taty ehksperimental'nogo issledovaniya vakuumnoj teploizolyacii dlya passazhirskogo vagona [Results of the experimental study of vacuum thermal insulation for a passenger car] / A.N. Balalaev, M.A. Parenjuk, D.M. Timkin // Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of transport of the Volga region]. — 2022. — № 1 (91). — P. 7–14. — EDN GVTMAA. [in Russian]
34. Balalaev A.N. Metodika ocenki privlekatel'nosti investicionnogo proekta vnedreniya novogo tipa teploizolyacii passazhirskogo vagona [Methodology for assessing the attractiveness of the investment project of introducing a new type of passenger car thermal insulation] / A.N. Balalaev, D.M. Timkin // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — № 4–1 (118). — P. 12–19. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.118.4.003. [in Russian]