МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Ф. МОРОЗОВА»

ИННОВАЦИИ В АВТОТРАКТОРНОЙ ОТРАСЛИ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы Всероссийской студенческой научной конференции

Воронеж, 15 апреля 2026 г.

Воронеж 2026

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
«VORONEZH STATE UNIVERSITY OF FORESTRY AND TECHNOLOGIES
NAMED AFTER G.F. MOROZOV»

INNOVATIONS IN THE AUTOMOTOR INDUSTRY: PROSPECTIVE TECHNOLOGIES

Materials of the All-Russian Student Scientific Conference

Voronezh, April 15, 2026

Voronezh 2026

УДК 629.33/.36:001.895
И66

Редакционная коллегия: д-ртехн. наук, проф. Годжаев З.А. (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ); д-р техн. наук, проф. Дидманидзе О.Н. (МГАУ им. Тимирязева); д-р техн. наук Загарин Д.А. (НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»); д-р техн. наук, проф. Евтюков С.А. (Институт безопасности дорожного движения. г. Санкт-Петербург); д-р техн. наук, доц. Хакимов Р.Т. (ФГБОУ ВО СПбГАУ); д-р техн. наук, проф. Онищенко Д.О. (МГТУ им. Н.Э. Баумана); д-р техн. наук, проф. Иванников В.А. (ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»); д-р техн. наук, проф. Кадырметов А.М. (ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»); д-р техн. наук, проф.Зеликов В.А. (ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»); д-р техн. наук, проф. Дорняк О.Р. (ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»); д-р техн. наук, проф. Посметьев В.И. (ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»).

И66 Инновации в автотракторной отрасли: перспективные технологии : материалы Всероссийской студенческой научной конференции, Воронеж, 15 апреля 2026 г. / отв. ред. В. И. Прядкин ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2026. – 176 с. – URL: https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2026/innovacii-v-avtotraktornoj-otrasli-perspektivnye-tehnologii/. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-7994-1265-4

Материалы конференции содержат результаты исследований студентов, магистрантов и аспирантов под руководством учёных в различных областях фундаментальных и прикладных наук, направленных на изучение различных процессов и явлений роботизации и автоматизации в автомобиле- и тракторостроении. Приведены разработки по повышению эффективности в автомобиле- и тракторостроении.

Материалы конференции предназначены для научных и педагогических работников, специалистов технических направлений, аспирантов и студентов.

УДК 629.33/.36:001.895

ISBN 978-5-7994-1265-4 © ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Быстров И.Р., Артёмов А.В., Поздеев И.А., Прядкин В.И. Увеличение площади контакта шины с дорогой как способ реализации тягово-сцепных свойств автомобиля……... 4
Горбунов В.П., Онищенко Д.О., Спиридонов Е.Г., Прядкин В.И. Водород как топливо для авиации: проблемы и перспективы…….. 14
Колосов К.С., Прядкин В.И., Новиков А.П. Повышение теплопроводности полимерных материалов методом магнитной ориентации дисперсных наполнителей: перспективы для транспортной отрасли…….…… 33
Колыхалова А.А, Рубцов Е.Г., Школьных А.В., Прядкин В.И. Силовые электродвигатели автомобилей: конструктивные особенности и пути совершенствования……..…….….. 42
Мазуров А.В., Бодаченко П.К., Затонский А.П., Мерчалов С.В., Прядкин В.И. Повышение эффективности работы воздушного фильтра ДВС тракторных дизелей путём применения дополнительной электростатической ступени очистки..……..….. 53
Онищенко Д.Д., Школьных А.В., Артёмов А.В., Прядкин В.И. Эволюция нормирования экологических требований в автомобилестроении (стандарты «ЕВРО») и пути совершенствования подходов к оценке экологичности автотранспорта…… 62
Поздеев И.А., Сотников Д.А., Колядин П.А., Прядкин В.И. Автомобильные заправочные станции водорода……..……... 68
Поздеев И.А., Татаринцев В.Ю., Колядин П.А., Мураткин С.Е., Прядкин В.И. Полигоны в США и Японии для испытаний шин: проблемы, пути решения …… 76
Сотников Д.А., Колядин П.А., Татаринцев В.Ю., Прядкин В.И. Коробки передач с автоматическим управлением российских грузовых автомобилей……. … 85
Сотников Д.А., Поздеев И.А., Остапенко И.В., Прядкин В.И. Автомобили на водороде: этапы развития и совершенствования…… 91
Сотников Д.А., Татаринцев В.Ю., Артёмов А.В., Школьных А.В., Прядкин В.И. Полигоны в Европе для испытаний шин: проблемы, пути решения…… 98
Татаринцев В.Ю., Мураткин С.Е., Артёмов А.В., Школьных А.В., Прядкин В.И. Разработка интеллектуальной системы адаптации колёсного движителя для лесных машин…….. 111
Федорин Ф.Д., Карпов А.А., Прядкин В.И. Метробус – новый вид городского транспорта: проблемы, пути решения……..…….…… 125
Федорин Ф.Д., Прядкин В.И. Автомобильные шасси артиллерийской установки БМ-13 «КАТЮША»……..……..…. 131
Федорин Ф.Д., Татаринцев В.Ю., Колядин П.А., Мураткин С. Е., Прядкин В.И. Полигоны в России для испытаний шин: отечественный опыт……... 147
Хрипченко М.С., Панченко С.Л., Головин А.С., Татаринцев В.Ю. Особенности эксплуатации резинокордных приводных ремней автомобилей в условиях Арктики…… 154
Щеклеин Д.А., Гончарова О.И., Алименко И.А., Прядкин В.И. Роботы для ухода и сбора клубники: отечественный и зарубежный опыт…….. 166

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_4-13
УДК 629.621.43.018

Быстров И.Р.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Артёмов А.В.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Поздеев И.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Bystrov I.R.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Artemov A.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pozdeev I.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

УВЕЛИЧЕНИЕ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ШИНЫ С ДОРОГОЙ КАК СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЯ

INCREASING THE CONTACT AREA BETWEEN THE TIRE AND THE ROAD AS A WAY TO IMPROVE A VEHICLE’S TRACTION AND GRIP PROPERTIES

Аннотация. В статье приведены известные ранее и инновационные методики измерения площади пятна контакта автомобильной шины с дорогой, Рассмотрены методы, которые также предполагают получение информации о распределении нормальной нагрузки или сопротивления качению.

Abstract. The article presents previously known and innovative methods for measuring the contact area between a car tire and the road surface. It also examines methods that involve obtaining information about the distribution of normal load or rolling resistance.

Ключевые слова: пятно контакта, шина, площадь пятна контакта, тягово-сцепные свойства, оптические методы, метод цифровой корреляции, оптоволоконный датчик, автомобиль.

Keywords: contact patch, tire, contact patch area, traction properties, optical methods, digital correlation method, fiber-optic sensor, automobile.

Введение

Первой ассоциацией слову «автомобильная шина» в большинстве случаев становятся те задачи, выполняя которые она решает проблемы, являющиеся

© Быстров И. Р., Артёмов А. В., Поздеев И. А., Прядкин В. И., 2026

предпосылками к ее созданию. В голове визуализируется то, что именно шина связывает автомобиль с дорожной поверхностью, именно шина принимает на себя сильнейшие удары с ее стороны и позволяет водителю управлять автомобилем с комфортом. Более того, шина позволяет реализовать все качества автомобиля, характеризующие его способность выполнять полезную работу: осуществлять перевозку пассажиров и грузов, обрабатывать почву, если речь идет о сельскохозяйственной технике и т.д. На данном этапе важно понимать, что целиком шина с дорожной поверхностью не контактирует. Все нагрузки шина воспринимает в пятне контакта, в нем же реализуются все тягово-сцепные и мощностные качества автомобиля. От его площади и формата зависит эффективность использования автомобиля, безопасность людей и грузов при его движении, расход топлива.

Первые методы определения площади пятна контакта шины с дорогой разрабатывались еще в середине XX века. Необходимость работ по исследованию пятна контакта шины с дорогой диктовалось стремительным внедрением автомобилей в жизнь. Требовалось обеспечить безопасность и более экономичный расход топлива при движении автомобиля. Главным «катализатором» в данном вопросе стала необходимость решения проблемы аквапланирования в 1960-х годах, ибо с ростом мощностей двигателей и появлением скоростных трасс полная потеря управления над автомобилем была для неподготовленного водителя фатальной.

В данной статье рассмотрим мировой прогресс в области разработок методов определения пятна контакта шин с дорогой.

История развития способов определения формы и площади пятна контакта шины с дорогой

Начало истории решения проблемы необходимости точного определения площади пятна контакта шины с дорогой было положено еще в 60-х годах прошлого века. Первым методом (рис. 1) стал, так называемый, «метод красящего вещества». Сущностью данного метода было покрытие шины красящим веществом, например краской, и ее прижатием к плоской поверхности, на которой лежал лист бумаги. Площадь полученного отпечатка определялась планиметром. Сама шина устанавливалась на стенде и нагружалась строго определенным весом без каких-либо движений. Это самый простой и «грубый» метод оценки параметров пятна контакта, тем не менее положивший основу для развития машиностроения в данном направлении.



а *б*

а – процесс снятия площади пятна контакта шины; *б* – пятно контакта шины на бумаге

Рисунок 1 – Метод определения параметров пятна контакта методом «красящего вещества»

К недостаткам данного метода можно отнести, во-первых, нечеткий контур получившегося отпечатка (поскольку краска могла растекаться), во-вторых, это очень трудоемкий сетод, потому что измерение площади полученного отпечатка планиметром – долгий процесс, требующий концентрации внимания. Кроме того, для объективного исследования работы шины требовалось снятие нескольких отпечатков под разной нагрузкой. Далее можно было построить график зависимости площади пятна контакта от вертикальной нагрузки [1, 2].

Помимо этого был разработан метод, суть которого заключалась в фиксации отпечатка шины на мягкой поверхности: на песке, снегу. Этот метод позволял оценить не только площадь, но и глубину колеи, тем не менее это все еще грубый и неточный метод [3].

В 70-80 годах XX века, когда уже был сделан вывод о том, что статических измерений параметров пятна контакта шины с дорогой недостаточно, были разработаны более прорывные методы работы по исследованию автомобильной шины. Распространение получил метод, предполагавший прижатие шины к прозрачной плоской поверхности (стеклянной) и фотографированием получившегося отпечатка снизу (рис. 2). Примером современного использования такого метода является испытание шины на стационарной системе фото и видеофиксации пятна контакта шины КУИДМ-2 (рис. 3). Данные способы менее трудоемки по сравнению с предыдущими, при том дают больше информации о взаимодействии шины с дорожными покрытием.

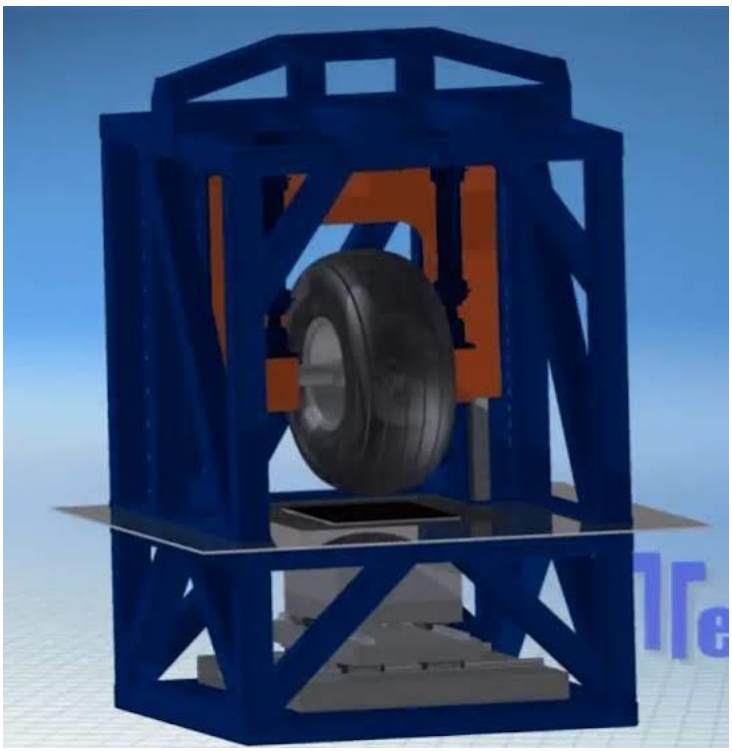


Рисунок 2 – Получение пятна контакта шины на оптическом стенда

Другой подобный метод, описанный в 2006 году, основан на нарушении полного внутреннего отражения света. Это так называемый метод стеклянного основания (Glass Plate Method).



Рисунок 3 – Отпечаток шины при ее исследовании на стационарной системе КУИДМ-2

В беговую дорожку стенда (рис. 4) монтируется стеклянная пластина, в торец которой подается мощный световой поток. Между шиной и стеклом помещается

тонкая пластиковая прослойка, из-за которой нарушается внутренее отражение света (между гранями стекла). Внизу установлена видеокамера, которая в реальном времени фиксирует формирующееся светящееся изображение через стекло. Таким образом, уровень яркости в каждом пикселе позволяет мало того, что получить форму и площадь пятна контакта, но и распределение по ней нормального давления

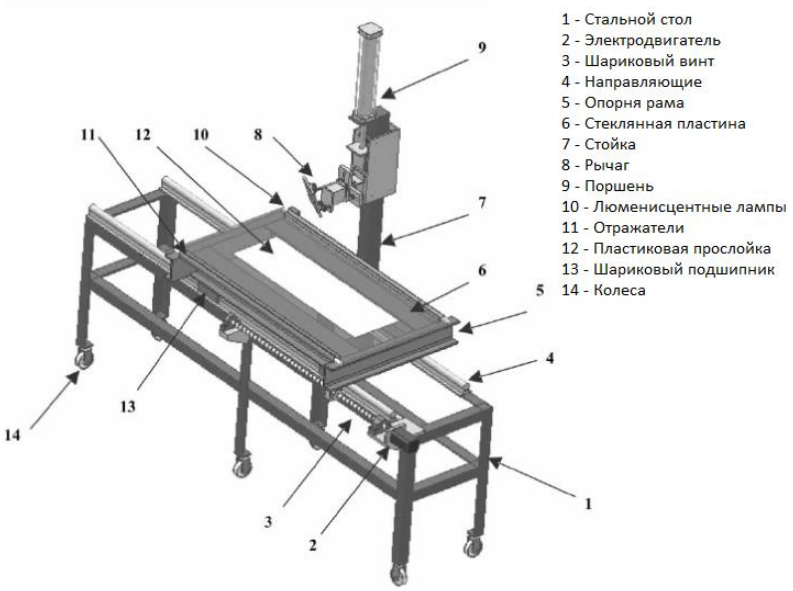


Рисунок 4 – Экспериментальный оптический стенд для определения пятна контакта

Явление нарушения полного внутреннего отражения (FTIR) света устанавливает, что когда свет проходит через среду и приближается к границе раздела с другой средой с другим показателем преломления, оптически менее плотной, чем первая, так что свет покидает ее, угол падения должен быть меньше критического (рис. 5).

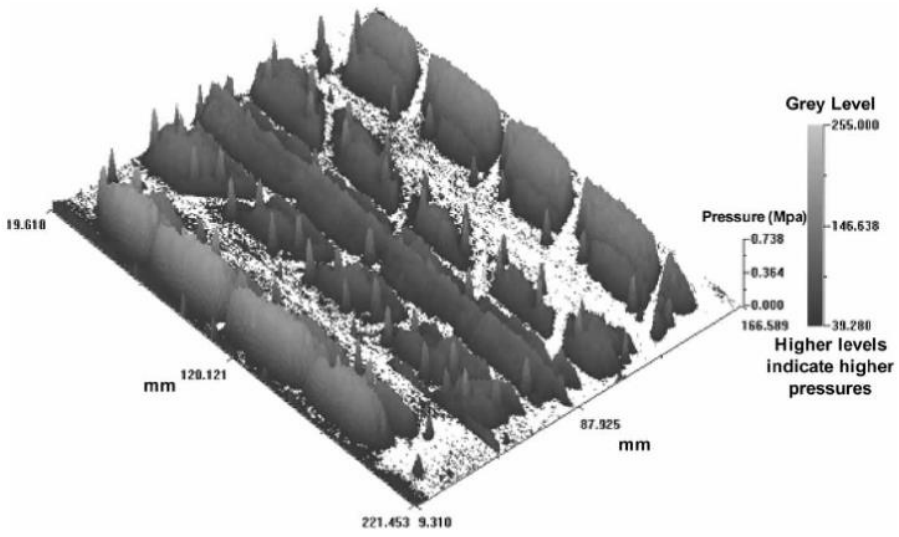
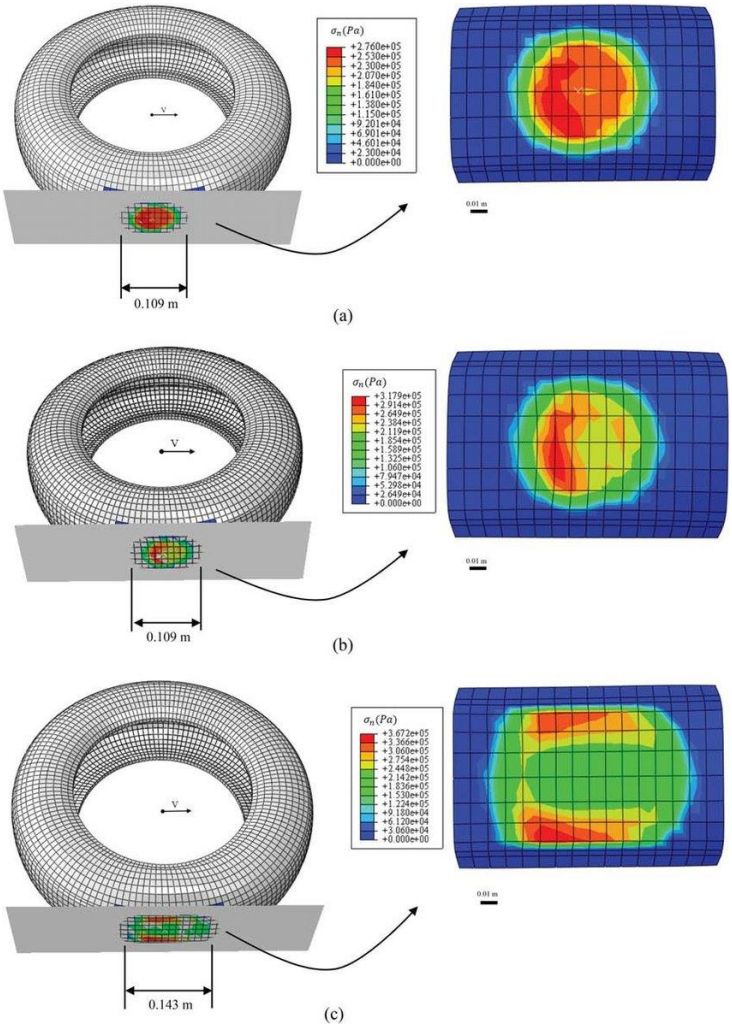


Рисунок 5 – Получившееся пятно контакта с учетом вертикальных нагрузок

Для угла падения больше критического свет оказывается запертым в более плотной среде и бесконечно отражается внутри нее. Если третья среда с большей оптической плотностью (например, тонкая пластиковая пленка) помещается в контакт со стеклом, и, если критический угол этого нового перехода больше, чем свет, который внутренне отражался под углом между и, теперь может выйти, нарушая полное внутреннее отражение. Таким образом, в точке контакта пластик-стекло появляется светящаяся точка, которую можно наблюдать с противоположной стороны стекла [4].

Итальянский шинный гигант Pirelli использует метод цифровой корреляции изображений (DIC) для изучения деформаций внутренней поверхности шины на стенде с плоской дорогой (рис. 6). Это дает возможность верифицировать компьютерные модели и понимать поведение шины в движении.



a – шина с нормальной нагрузкой 2000 Н и коэффициентом трения 0,4; *b* – шина с нормальной нагрузкой 2000 Н и коэффициентом трения 0,85; *c* – шина с нормальной нагрузкой 4000 Н и коэффициентом трения 0,4

Рисунок 6 – Распределение нормального контактного давления в зоне контакта

Работает это следующим образом: на поверхность шины наносится контрастный узор краской. 2 камеры снимают деформацию этого узора в реальном времени, а далее с предоставленной от них информации компьютер сравнивает миллионы точек до и после нагрузки, строя 3D карты деформаций [5].

Следующим является метод, предполагающий использование тензометрических матриц. Как правило, эти методы используются на заводах в исследовательских отделах. Суть метода заключается в том, что на панель со встроенными датчиками силы (пьезоэлеткрическими, например), нагружается шина, причем либо статически, либо же в движении на барабане. Каждый датчик на панели, взаимодействующий, в результате контакта, с шиной, измеряет вертикальные давления в отдельно взятых точках и продольные и поперечные силы, что позволяет более точно моделировать управляемость. В мировом опыте широко распространены достижения системы «TireScan» и «High Speed TireScan», которые позволяют наглядно уидеть эпюру давления и сравнить разные шины [6, 7].

Современные разработки – гибкие тензометрические матрицы, так называемые «коврики». Компания TecScan получила на эту технологию 18 патентов, став самым ярким представителем разработчиков данной технологии.

«Коврик» представляет собой тонкую, гибкую и, что особенно важно, портативную полоску материала (майлара) с напечатанным на ней массивом датчиков, располагающихся в линейку 1 x N (рис. 7). Ключевые преимущества этой разработки в том, что она позволяет исследовать пятно контакта колеса в динамике, причем на скорости до 265 км/ч, давая при этом информацию о размере, форме и профиле вертикальной нагрузки. К недостаткам же можно отнести сильную чувствительность к сдвигу и то, что «коврик» позволяет отследить только вертикальную нагрузку, не давая информации о продольных и поперечных силах [7].

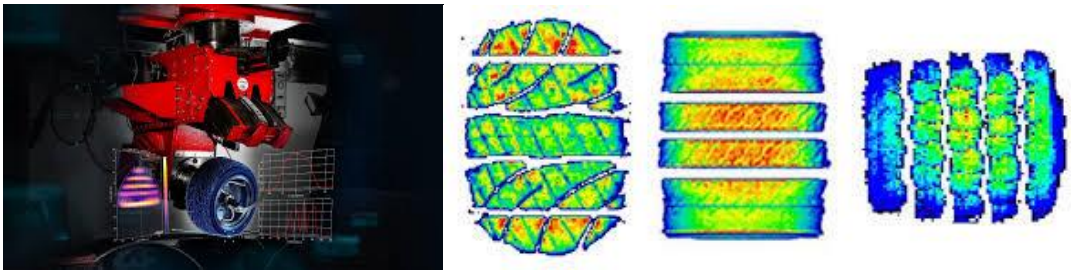


Рисунок 7 – Использование «коврика» для получения пятна контакта

В 2010-х годах начали развиваться методы, измеряющие пятно контакта напрямую с помощью лазера.

Римский университет Сапиенца разработал проект OPTYRE, ставший первым практическим применением волоконно-оптических датчиков на основе решеток Брэгга для измерения деформации шины в реальных условиях движения (рис. 8). В 2017 годы были проведены первые эксперименты поизмерению параметров внутренней деформации шины.



Рисунок 8 – Применение оптоволоконных датчиков для измерения деформации шины в реальных условиях

Инновация этой разработки заключается в возможности прямого доступа к поведению внутренней части шины с точки зрения напряжений при экспериментальном наблюдении качения в реальных условиях.

В процессе исследований и публикаций работ в данном направлении команда проекта сделала несколько ключевых выводов, среди которых: возможность в реальном времени четко разграничивать внутри одного и того же пятна контакта зону чистого сцепления и зону микропроскальзывания; вывод о том, что существующие методы измерения существенно занижали реальную длину пятна контакта, что приводило к общему снижению точности [8].

Заключение

Проблемой пятна контакта занялись инженеры еще в XX веке. Вопрос о недостаточной точности измерений стоит и сейчас, когда требования к шинам растет. передовые методы, позволяющие с высокой точностью исследовать пятно контакта, развиваются и по сей день. Опыт команды, работавшей над проектом Optyre вовсе показал, что традиционные и более распространенные методы определения пятна контакта существенно неточны и менее универсальны, поскольку не дают возможности оценить ряд параметров, которые метод, разработанный командой проекта, позволяет оценивать с достаточно высокой, на данный момент, точностью. От автомобилей требуется большая работа, а на

шины, соответственно, приходятся большие нагрузки, поэтому инновации, вводимые учеными и инженерами, высоко ценятся и, что еще более важно, дают толчок к развитию других направлений, поскольку интеграция оптоволоконных датчиков в шину открывает новые возможности. Тем не менее, классические оптические методы применяются до сих пор, обеспечивая приемлемую точность с точки зрения производства автомобильных шин.

Список литературы

1. Черепанов Л.А., Олейник А.А. Стенд для исследования влияния вертикальной нагрузки на площадь пятна контакта шины с опорной поверхностью // Транспортные системы. – 2017. – № 3 (6). – С. 27–31.

2. ГОСТ Р 58656-2019 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. – Введ. 2020-08-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.

3. Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа автомобильной шины / под общ. ред. В.И. Кнороза. – М. : Транспорт, 1976. – 238 с. : ил.

4. Magic Formula tyre model with transient properties / H. B. Pacejka, I. J. M. Besselink. – DOI 10.1080/00423119708969658 // Vehicle System Dynamics. – 1997. – Vol. 27, no. sup1. – P. 234–249.

5. An investigation towards intelligent tyres using finite element analysis / P. Behroozinia, S. Khaleghian, S. Taheri, R. Mirzaeifar. – DOI 10.1080/00423114.2018.1475734 // Vehicle System Dynamics. – 2019. – Vol. 57, no. 1. – P. 1–17.

6. Ермошин Н.А., Симчук А.Е. Оценка влияния геометрии и механики пятна контакта шины грузового автомобиля на дорожную одежду. – DOI 10.70991/1815-896X-2026-1-55-33-48. – EDN АКТРТР // Дороги и мосты. – 2026. – № 55/1. – С. 33–48.

7. Tire Footprint Pressure Mapping // Tekscan. – URL: https://www.tekscan.com/tire-footprint-pressure-mapping (дата обращения: 07.06.2026).

8. Roveri N., Pepe G., Mezzani F., Carcaterra A., Culla A., Milana S. OPTYRE — Real Time Estimation of Rolling Resistance for Intelligent Tyres. – DOI 10.3390/s19225119 // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 22. – P. 5119.

References

1. Cherepanov L.A., Oleinik A.A. Stand for studying the effect of vertical load on the contact area between a tire and a supporting surface // Transport Systems. – 2017. – No. 3 (6). – Pp. 27–31.

2. GOST R 58656-2019 Mobile agricultural machinery. Methods for determining the impact of propulsion systems on soil. – Introduced. 2020-08-01. – Moscow: Standartinform, 2019. – 24 p.

3. Knoroz V.I., Klennikov E.V., Petrov I.P., Shelukhin A.S., Yuryev Yu.M. Operation of an Automobile Tire / edited by V.I. Knoroz. – Moscow: Transport, 1976. – 238 p.: ill.

4. Magic Formula tire model with transient properties / H.B. Pacejka, I.J.M. Besselink. – DOI 10.1080/00423119708969658 // Vehicle System Dynamics. – 1997. – Vol. 27, No. sup1. – pp. 234-249.

5. Investigation of intelligent tires using the finite element method / P. Behrouzinia, S. Khalegian, S. Taheri, R. Mirzaifar. – DOI 10.1080/00423114.2018.1475734 // Dynamics of transport systems. – 2019. – Vol. 57, No. 1. – Pp. 1–17.

6. Ermoshin N.A., Simchuk A.E. Assessment of the influence of the geometry and mechanics of the tire contact patch of a truck on the road surface. – DOI 10.70991/1815-896X-2026-1-55-33-48. – EDN AKTPTP // Roads and Bridges. – 2026. – No. 55/1. – pp. 33-48.

7. Determination of tire pressure // Tekscan. – URL: https://www.tekscan.com/tire-footprint-pressure-mapping (date of access: 06/07/2026).

8. Roveri N., Pepe J., Mezzani F., Carcaterra A., Kulla A., Milana S. OPTYRE — assessment of rolling resistance in the real–time for intelligent buses. – DOI 10.3390/s19225119 // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 22. - p. 5119.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_14-32
УДК 662.769.21

Горбунов В.П.
доктор техн. наук, доцент кафедры Технической эксплуатации авиационного, электрифицированного и пилотажно-навигационного оборудования Московского государственного технического университета гражданской авиации, РФ
Онищенко Д.О.
доктор техн. наук, профессор кафедры поршневые двигатели Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, РФ
Спиридонов Е.Г.
доктор техн. наук, профессор Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Gorbunov V.P.
Doctor of technical sciences, Associate professor of the Electical and Flight Control - Navigation Systems Technical Operation Department
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Russian Federation
Onishchenko D.O.
Doctor of technical sciences,
professor of the Department of Piston Engines Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation
Spiridonov E.G.
Doctor of technical sciences, professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doktor of technical sciences, professor, department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ВОДОРОД КАК ТОПЛИВО ДЛЯ АВИАЦИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

HYDROGEN AS AN AVIATION FUEL: PROBLEMS AND PROSPECTS

Аннотация. В статье представлен анализ снижения экологической нагрузки на окружающую среду от авиационных двигателей, и частности в Арктической зоне Российской Федерации, путем применения водорода в качестве топлива. Показаны основные направления развития авиации, использующей в качестве топлива водород. Приведены основные направления получения водорода и оценка влияния каждого способа на экологию. Проведенным анализом установлено, что водород является высокоэффективным и экологически чистым топливом для авиации. Однако применение водорода в качестве топлива для авиации требует решения новых научно-технических задач: разработки и создания сети заправочных станций и способов его хранения, изменения компоновки фюзеляжа самолетов различного исполнения, разработки более жестких требований безопасности и надежности эксплуатации оборудования на борту самолета, новых требований к квалификации обслуживающего персонала и других.

Abstract. The article presents an analysis of reducing the environmental impact of aircraft engines, particularly in the Arctic zone of the Russian Federation, by using hydrogen as a fuel. The main directions for the development of aviation that uses hydrogen as fuel are shown. The main methods of hydrogen production and an assessment of the environmental impact of each method are

© Горбунов В. П., Онищенко Д. О., Спиридонов Е. Г., Прядкин В. И., 2026

presented. The analysis has established that hydrogen is a highly efficient and environmentally friendly fuel for aviation. However, using hydrogen as a fuel for aviation requires solving new scientific and technical problems: developing and creating a network of refueling stations and methods for storing it, changing the fuselage layout of aircraft of various designs, developing stricter safety and reliability requirements for the operation of equipment on board the aircraft, new requirements for the qualifications of maintenance personnel, and others.

Ключевые слова: Арктика, воздушные суда, полярная авиация, двигатели, водородное топливо, экология.

Keywords: The Arctic, aircraft, polar aviation, engines, hydrogen fuel, ecology.

Введение

Развитие сети автомобильных дорог в Арктических районах существенно затруднено из-за необходимости преодоления географического и в особенности климатического фактора. Исходя из этого, до большинства населенных пунктов и небольших поселков большую часть года можно добраться только по воздуху. Кроме того, очевидно, что развитие более интенсивного судоходства по Северному морскому пути (СМП) не окажет существенную роль в проблеме доступности удаленных районов Арктической зоны, так как значительная часть арктических населённых пунктов расположена далеко от морского побережья. Более того, морской маршрут существенно уступает воздушному по скорости доставки. На основе проведённого анализа можно уверенно прогнозировать рост спроса на авиаперевозки в Заполярье. Уже в период с 2016 по 2019 годы наблюдался подъём на 30 %. Без быстрого доступа к Заполярью невозможно реализовать ни один крупный инвестиционный проект. Наличие авиатехники, способной к арктическому базированию и эксплуатации в условиях экстремально низких температур, остаётся ключевым фактором обеспечения безопасности Северного морского пути и повышения конкурентоспособности России на глобальном арктическом рынке. В связи с этим развитие полярной авиации было объявлено одной из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации в Арктике до 2035 года [1].

Вместе с тем интенсивное использование воздушного транспорта приводит к значительному росту антропогенных выбросов в атмосферу. При полётах на высотных эшелонах в верхнюю стратосферу и нижнюю мезосферу попадает на порядок больше продуктов сгорания, чем в приземные слои. К числу наиболее устойчивых по эмиссии компонентов относятся окислы азота, углекислый газ и водяной пар. Именно поэтому наиболее критическое экологическое воздействие на экологию Крайнего Севера и Арктики оказывает именно развитие кросс-полярных маршрутов.

Полёты через Северный полюс и приполюсное пространство в настоящее время разрешены для гражданской авиации. Российская Федерация обеспечивает работу четырёх основных международных кросс-полярных маршрутов, включая маршруты Polar 1, Polar 2, Polar 3 и Polar 4, которые проходят непосредственно через Северный полюс. Эти направления активно используются авиакомпаниями Азии и ранее - Северной Америки как наиболее короткие пути между Азией и Америкой. Данные рейсы, продолжительностью до 17 часов, требуют обязательного оснащения воздушных судов высокоточными навигационными и спутниковыми средствами связи (GPS и Satellite Communication), а также сертификации по правилам ETOPS с максимальным временем полёта на одном двигателе до 370 минут (лидер - Airbus A350). Кроме того, трансполярные маршруты характеризуются повышенным уровнем коротковолновой солнечной радиации, что может вызывать перебои в работе радиооборудования и навигационных систем. Для обеспечения надёжности требуется дублирование бортовых навигационных и коммуникационных средств, а также мониторинг экипажей по количеству выполненных рейсов [2].

Интенсификация гражданской авиации может существенно повлиять на глобальный климат. При сохранении текущих темпов роста уже во второй четверти XXI века ожидается прекращение роста антропогенного потепления, а при дальнейшем увеличении числа воздушных судов - даже его снижение. Чем быстрее будет развиваться авиационный парк, тем раньше начнётся стабилизация и последующее снижение средней приземной температуры.

Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В целях предотвращения дальнейшего роста глобального антропогенного потепления в 1997 году был принят Киотский протокол, который устанавливал ограничения на выбросы парниковых газов. Однако данный документ имел спекулятивный характер и был направлен преимущественно на торговлю квотами на углекислый газ. При этом в нём полностью отсутствовало упоминание о мировом океане, являющемся одним из главных поставщиков парниковых газов, в том числе водяного пара [1].

Выполнение обязательств по Киотскому протоколу оказалось крайне сложным из-за необходимости огромных финансовых вложений и разработки новых технологий снижения антропогенных выбросов. К настоящее время данный протокол прекратил своё действие. На смену ему пришло Парижское со-

глашение 2015 года, эффективность которого в настоящее время ещё предстоит оценить на практике.

Вместе с тем, как показывают проведённые выше исследования влияния авиации на климат, решение проблемы глобального потепления может быть достигнуто значительно меньшими затратами. В наше время активно изучается возможность использования в авиации альтернативного топлива. Авиакеросин, который сейчас используется по всему миру, получается путём переработки нефти, и соответственно, является невозобновляемым источником энергии. Вдобавок к этому, цена на него постоянно растёт, что влечет за собой снижение экономичности перелётов. Внедрение новых видов топлива позволит повысить экономичность летательных аппаратов, а также снизить загрязнение атмосферы. На данный момент самыми перспективными топливами являются сжиженный водород и природный газ. Для объективной оценки перспективных проектов силовой установки и летательного аппарата (ЛА - СУ - Т) наиболее эффективным подходом является системный анализ [2,3]. Он позволяет построить формализованную модель систему, сформулировать критерии решение задачи и последовательно выполнить её исследование.

В настоящее время газовые топлива (водород и природный газ) обладают рядом несомненных преимуществ. Их ресурсы практически неисчерпаемы, а продукты сгорания имеют наилучшие эколого-токсилогические показатели среди всех известных видов топлива. Это делает газовые топлива наиболее привлекательными среди прочих инструментов снижения вредных выбросов в атмосферу.

Диапазон воспламенения топливо-воздушной смеси на основе водорода варьируется от 5 до 75% его концентрации, что является недостижимым показателем для двигателя, работающего на керосине. Керосиновый двигатель не может поддерживать стабильную работу на сильно обеднённых или на слишком богатых смесях. Так же было установлено, что повысить эффективность керосиновых двигателей можно добавкой в керосино-воздушную смесь около 10% водорода (от массы керосина). Этот метод может значительно расширить диапазон возможностей современных гиперзвуковых двигателей.

Предмет исследования

Водород в настоящее время является высокоэффективным и экологически безопасным энергоносителем. Его крупномасштабное применение уже освоено в промышленных химических процессах и ракетной технике. По данным миро-

вого рынка, в 2025–2026 годах производство водорода превысило 110 млн тонн и продолжает расти стремительными темпами. Сейчас водород все еще незаметен в мировом энергобалансе из-за дороговизны технологий. 1 кг водорода сейчас в среднем стоит около 10 долларов США, но, как показывает практика, развитие технологического процесса и наращивание объёмов производства позволяет со временем снижать стоимость энергоносителей [4,5]. Как утверждают эксперты, в перспективе ближайших 15 лет удастся снизить стоимость водородного топлива на 50% [6]. Министерство энергетики Российской Федерации прогнозирует повышение спроса на водород в ближайшие годы, а в перспективе 20-25 лет мировой рынок водорода может достичь показателей объёма около 450 млн. тонн, что сделает его заметным в общем объёме мирового энергобаланса [4].

Водород является возобновляемым источником энергии, так как производится из воды с помощью ядерных, либо же возобновляемых ресурсов. Этот факт является одним из ключевых преимуществ водорода перед другими видами топлива. Диапазон его применения крайне широк: полученная с помощью водорода электроэнергия может закрывать как бытовые потребности, так и использоваться на транспорте, в авиации, промышленности и тд.

По способу получения, а также степени экологичности, выделяют цветовые градации водорода, представленные на рисунке 1. Большая часть объёма производства водорода по всему миру приходится на «серый» водород (около 75%). Он получается при смешении нагретого природного газа с паром, в результате чего выделяется большое количество углекислого газа. Этот метод является наименее экологичным, относительно других, но при этом требует минимальных затрат. «Бурый» или «Коричневый» водород получают при газификации угля. При этом процессе так же выделяются парниковые газы. К этому типу относится более 20% получаемого водорода в мире. Более чистым является метод получения «голубого» водорода: его получают из природного газа, улавливая отходы производства для вторичной переработки. Однако данный метод не является идеально чистым, так как диоксид углерода все же нужно утилизировать, что требует дополнительных затрат. «красный» водород производят с помощью атомной энергии. «Бирюзовый» водород получают, нагревая природный газ в вакууме, до температуры 900°C. При этом остается твердый углерод, который востребован в промышленности и не выхывает проблем с утилизацией [4,5]. Самый чистый – «зеленый» водород получают методом электролиза воды с использованием ВИЭ. При этом методе не выделяется ни-

каких вредных веществ, благодаря чему «зеленый» водород привлекателен для зеленой энергетики. Однако, несмотря на тенденцию снижения выбросов в атмосферу, и соответствия этому направлению чистых методов получения водорода, они являются наиболее затратными и менее обеспеченными сырьем. Сейчас по всему миру рассматривается возможность использования избытка электроэнергии от различных типов электростанций для синтеза водорода. Необходимость использовать в энергетических установках водород в чистом виде сопряжена с большим количеством проблем, связанных с коммерческим производством, нормами безопасности, а также сжиганием.

Методы и методология исследования

В качестве первого этапа развития водородной энергетики рассматривается добавление водорода в природный газ для использования в существующих магистральных и распределительных сетях. При этом сжигание водородсодержащих газов (ВСГ) позволит заметно снизить выбросы углекислого газа в атмосферу по сравнению с чистым природным газом.

Применение водорода в значительной степени ужесточит требования к надёжности оборудования, поскольку контакт с этим топливом вызывает сильное охрупчивание металла. В результате появляются риски растрескивания труб газопроводов и возникновения аварийных ситуаций. Поэтому необходимы разработка и внедрение принципиально новых подходов к проектированию, изготовлению и эксплуатации газотранспортных систем и оборудования.

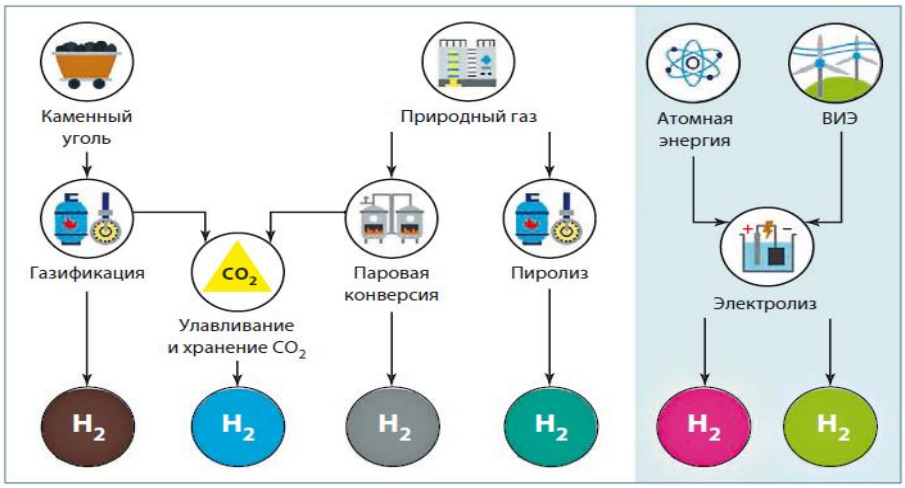


Рисунок 1 – Способы получения водородного топлива

По распоряжению Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р разработан план мероприятий «Развитие водородной энерге-

тики до 2024 года», направленный на расширение сферы применения водорода. в рамках этого плана, помимо прочего, планируется разработать и испытать котлы и газотурбинные установки на метано-водородном топливе, а так же осуществить выработку водорода на различных типах электростанций.

Согласно расчетам, снижение выбросов углекислого газа на 7–11% достигается добавлением 20-30% объема водорода в уже существующую систему распределения и транспортировки природного газа. Если же водород сжигается в чистом виде, продукты сгорания становятся полностью углерод-нейтральными, как видно на графике (рис. 2).

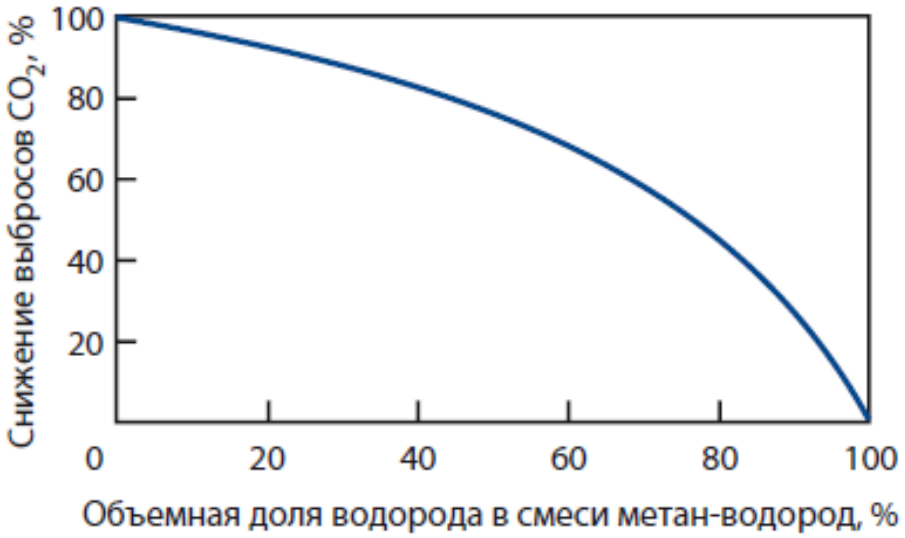


Рисунок 2 – График снижения выбросов CO2 в водородном двигателе

Проблему смены видов топлива сейчас решает не только авиация. Текущая «Нефтяная» эпоха рано или поздно сменится другой, более совершенной. Для этого сейчас важно решить главную задачу: сделать процесс синтеза водорода максимально простым и дешевым, чтобы его применение в качестве топлива было экономически целесообразным. В авиации же, актуальность проблемы перехода на новые виды топлива обусловлена тем, что новейшие разработки в области реактивных двигателей для сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов требуют значительного повышения эффективности двигателя. Для этого нужно максимально эффективно использовать топливную теплопроизводительность. Однако это невозможно, так как современные газовые турбины имеют диапазон рабочих температур примерно 1227 °C до 1927 °C. Даже при условии, что удастся создать газовую турбину, способную исправно работать при больших температурах, и КПД всех основных элементов двигателя будет

максимальным, ограниченные энергетические возможности авиакеросина не дадут поднять эффективность всей системы более чем на 10% [2].

В современных турбореактивных двигателях из всего диапазона эксергетических возможностей топлива, реализуется лишь его теплотворность. Однако и по этому показателю, газовые топлива превосходят классический авиакеросин, так как обладают примерно в 3 раза более высокой теплотой сгорания [7]. Помимо этого, использование криогенных топлив позволяет внедрить совершенно новые принципы работы систем СУ, которые невозможны при работе на керосине. Одним из таких принципов является охлаждение воздушного потока до компрессоров за счет хладоресурса газового топлива. Это позволяет продлить срок службы элементов двигателя, так как на них будет оказываться меньшая тепловая нагрузка. Так же, благодаря большей газовой постоянной относительно нефтепродуктов, водород способен совершать полезную работу еще до своего сгорания. Например, он способен дополнительно раскручивать вал турбины, что позволяет повысить эффективность использования топлива [7,12]. Возможность получения электрохимическим окислением газа электрического тока из водорода позволяет создать самолёты, оснащенные электрическими двигателями, эффективность которых можно дополнительно повысить созданием низких температур, получаемых за счет хладоресурса топлива.

Стоит отметить еще один фактор, подчеркивающий необходимость оптимизации применения топлива. Использование традиционного нефтяного топлива неизбежно связано с большим количеством вредных веществ, попадающих в атмосферу. Стандарт ИКАО (Охрана окружающей среды. Приложение № 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. 2008) [4] предъявляет особые требования к экологичности магистральных самолетов. Еще более строгим документом является принятый в декабре 1997г. в г. Киото, в Японии, протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, направленный против глобального потепления. Нормы этих документов предъявляют серьезные требования к выбросам вредных веществ самолетами, которые на практике практически нереализуемы на традиционных видах топлива. К тому же, цена авиакеросина постоянно растёт, что негативно сказывается на экономичности авиаперевозок. Например, в России, в период 2000-2006 гг. цена на авиакеросин марки ТС-1 Выросла более чем в 4 раза. Вследствие этого, переход на новые виды топлива является одним из ключевых моментов стратегии решения этих проблем.

Помимо очевидных преимуществ водорода перед авиакеросином, у него есть некоторые особенности, которые создают сложности для повсеместного быстрого перехода на этот вид топлива. Первая из них – объём топливных баков. Из-за того, что даже в жидком состоянии, водород обладает меньшей плотностью, относительно авиакеросина (примерно в 11 раз) [7], он требует размещения на борту самолета топливных резервуаров, примерно в 3,8 раз превосходящих баки для керосина. При этом в общей массе, водородное топливо будет в 3 раза легче. Это вызывает необходимость внесения изменений в компоновку ЛА. Топливные баки можно разместить над удлиненной частью фюзеляжа (рис. 3), или же использовать подвесные топливные баки, что позволит освободить внутреннее пространство.

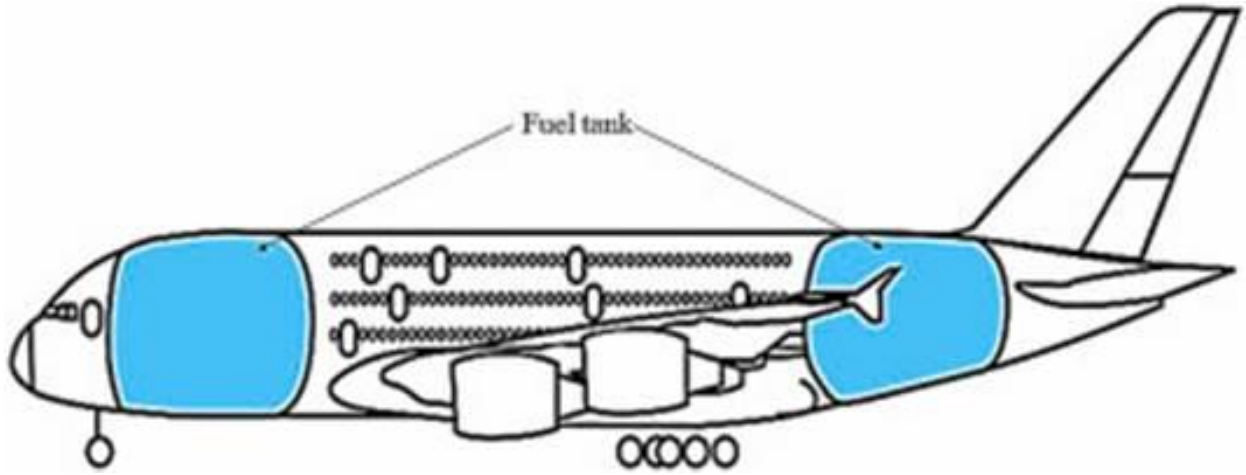


Рисунок 3 – Размещение баков с водородным топливом внутри фюзеляжа

Второй проблемой является взрывоопасность газового топлива. В случае утечки, водород, вступая в реакцию с кислородом, образует крайне взрывоопасную смесь двух объёмов водорода и одного объёма кислорода, получившую название гремучий газ. Из этого следует, что помимо прочих сложностей, обслуживающий персонал ЛА должен иметь более высокую квалификацию, чем персонал ЛА с традиционным топливом [7, 8]. При испытании самолетов на водородном топливе, на случай утечек, топливный отсек постоянно продувался азотом в целях противопожарной безопасности (рис. 4).

Все вышеуказанные факторы указывают на перспективность перехода летательных аппаратов на газовые топлива. Несмотря на то, что эта задача требует комплексного подхода к решению сложных проблем, возникающих при ее реализации, газовые топлива имеют большой потенциал, обеспечивающий им будущее применение в различных сферах.



Рисунок 4 – Баллоны с азотом на боту экспериментального самолета

Дискуссия

Первое упоминание о возможности использования водорода в качестве топлива уходит в далекий 1936 год, когда известный немецкий авиаконструктор Эрнст Хейнкель основатель фирмы «Heinkel», поручил одному из своих авиаконструкторов, а именно Хансу фон Охайну, создателю первого в мире турбореактивного самолета Не-178 с двигателем HeS-3 фон Охайна, разработать турбореактивный двигатель. В 1937 году фон Охайн обнаружил, что его экспериментальный турбореактивный двигатель хорошо работает и на газообразном водороде. После ряда доработок, в 1939 году был создан усовершенствованный двигатель HeS 3B, который работал на жидком топливе (бензине или дизельном). В августе 1939 года He 178 поднялся в воздух, что стало первым в мире полётом самолёта с турбореактивным двигателем. Разработка He 178 и двигателя HeS 3 стала важным этапом в истории авиации, доказав принципиальную возможность использования газотурбинных двигателей [9]. С тех пор в авиаконструкторы и разработчики двигателей в разных странах и на обоих континентах задумывались над возможностью использования водорода в качестве авиационного топлива в жидком или газообразном состоянии.

В США, после испытаний водородного двигателя J-57 американской фирмы «Пратт & Уитни» в 1957 году ученые оценили преимущества водородного топлива. В том же году был испытан самолет B-57, оснащенный водородной топливной системой [8]. Хотя в данной области учеными и конструкторами

обоих континентов и были достигнуты значительные успехи, в авиастроении, дальше чем создание экспериментальных прототипов небольших воздушных судов со смешанными силовыми установками, включающих также электрические силовые установки, дело не пошло. Наиболее значимые результаты исследований были получены советскими учеными ОКБ Туполева на самолете Ту-155 (рис. 5) [8]. По результатам испытаний, использование водородного топлива увеличивает ресурс работы двигателя самолета на 25%. Это обусловлено отсутствием нагарообразования в газовоздушном тракте. Но дальше экспериментальных полетов, как указывалось выше, процесс создания и использования в производстве грузовых или пассажирских авиалайнеров не нашел своего промышленного воплощения из-за ряда не решенных задач и конструктивных проблем, например, хранения топлива на борту.



Рисунок 5 – Экспериментальный самолёт Ту-155 ОКБ Туполева

С аналогичными проблемами столкнулись и другие мировые участники авиастроительной отрасли [19]. Так, крупнейший производитель самолетов в мире западноевропейский концерн Airbus, производящий порядка 800 гражданских воздушных судов в год, анонсировав в 2020 проект нового самолета с нулевым уровнем выбросов на водородном топливе, отказался от него уже в июне 2026 года по причине проблем в конструкции самолета и топливных баков, а также проблем в инфраструктуре, самом топливе и регуляторных ограничениях [10,11,12].

На горизонте ближайших 10-15 лет водородная авиация выглядит не как замена обычным турбореактивным двигателям «один к одному», а как переход к совершенно иной архитектуре самолёта. Причём наиболее перспективным крупные производители сейчас считают не просто сжигание водорода в турбине, а систему, совмещающую водородные топливные элементы и электродвигатели. Компания Airbus посчитала наиболее перспективной fuel-cell архитектуру, которая заключается в электрохимическом превращении водорода в электричество, которое приводит в действие электромоторы, вращающие лопасти винтов. Airbus делает именно на это ставку. Сейчас эта концепция выглядит наиболее перспективной для малых и региональных самолётов. В июле 2026 года Airbus объявил о намерении вместе с MTU создать совместное предприятие для разработки и сертификации полностью электрического водородного двигателя [10,11,12].

Британский двигателестроительный гигант «Rolls-Royce» продолжает одновременно исследовать водородное горение в газотурбинном двигателе и оценивает водородные топливные элементы (hydrogen fuel cells) как более подходящий вариант прежде всего для малых и средних мощностей. Компания указывает на возможность применения водородного горения в сегменте узкофюзеляжных самолетов, но считает технологию ещё требующей существенной доводки. Так как, согласно, результатов отечественных и зарубежных исследований [13,14,15,16,19], одной из наиболее важных технологических задач, как и согласно данных отечественных ученых приоритетным является обеспечение безопасного хранения водорода на борту и обращение с ним. Утверждается, что сжатого газообразного водорода может быть достаточно для небольших ближнемагистральных самолетов, но жидкий водород имеет решающее значение для дальнемагистральных самолетов, поскольку позволяет ограничить объем и вес бака. По оценкам ученых, при повышении гравиметрической эффективности бака более чем на 55%, что возможно при использовании водорода в жидкообразном состоянии LH_2, потребление энергии водородными самолетами снижается по сравнению с керосиновыми самолетами по мере увеличения дальности полета. Хотя баки для жидкообразного водорода LH_2 обычно используются в ракетах, баки для самолетов требуют более длительного срока службы и меньшей скорости выкипания. Кроме того, топливные системы самолетов должны выдерживать меньший массовый расход и большее количество циклов, чем системы ракетного топлива. В долгосрочной перспективе резервуары водорода в жидкообразном состоянии LH_2 с вакуумной изоляцией могут стать наиболее

эффективным решением для хранения водорода в самолетах. Исследовательские усилия должны быть направлены на снижение их веса с помощью новых материалов, конструкций и технологий производства. Встроенные резервуары – это еще один способ уменьшить вес бортового хранилища водорода. Конформные топливные баки как дополнительные внешние топливные баки, которые плотно прилегают к корпусу самолета могут быть оптимальным решением, если снижение веса компенсируется снижением лобового сопротивления планера. Водородные самолеты могут использовать обычные газовые турбины для приведения в движение. Усовершенствованные газовые турбины преобразуют топливо в механическую работу с эффективностью около 40%. При использовании газовых турбин используются существующие знания, инструменты проектирования и технологии производства. Камера сгорания, спроектированная с учетом тепловых свойств водорода и его горения, является единственным существенным изменением в турбомашинах. Ожидается, что удельная тяга водородных турбовентиляторных двигателей будет примерно такой же, как и у турбовентиляторных двигателей, работающих на керосине. За счет использования уникальных свойств водорода возможны дальнейшие усовершенствования существующих технологических решений и разработка новых технологических подходов [15].

Самолеты с двигательными установками на топливных элементах могут быть действительно летательными аппаратами с нулевым уровнем выбросов, если избежать образования инверсионного следа за счет управления водяным выхлопом. При этом стоит задача необходимости повысить удельную мощность, эффективность и долговечность авиационных топливных элементов (рис. 6).

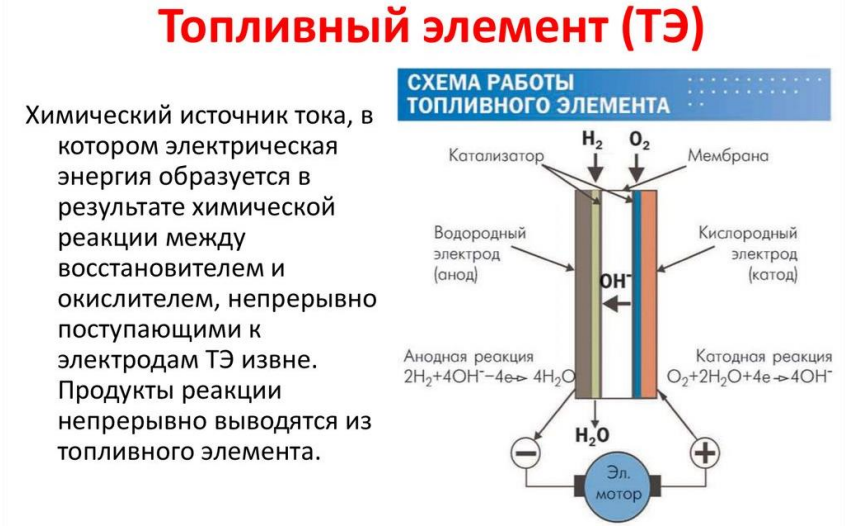


Рисунок 6 – Схема работы водородного топливного элемента

В зависимости от конструкции самолета и топливных элементов, силовая установка на топливных элементах для узкофюзеляжного транспортного самолета, по оценкам ученых, в три раза тяжелее аналогичной турбовентиляторной силовой установки. Для самолетов, работающих на топливных элементах, требуются тщательно разработанные системы терморегулирования, чтобы снизить вес и лобовое сопротивление. Инновационные конструкции могут использовать тепло, выделяемое топливным элементом, для других целей, таких как управление накопителем жидкообразного водорода LH_2 [15,16].

Обсуждение результатов исследования

В большинстве предлагаемых концепций водородных самолетов используется традиционная конструкция с цилиндрическим фюзеляжем и крылом, поскольку в отрасли имеются технологии и опыт проектирования воздушных судов классической схемы, состоящей из цилиндрического фюзеляжа и крыла. Однако значительный стимул для снижения веса и аэродинамического сопротивления, связанный с хранением водорода на борту, может подтолкнуть созданием конструкции самолетов к использованию нетрадиционных конфигураций, таких как комбинированные конструкции по типу единой обтекаемой конструкции фюзеляжа и крыльев. Водород обладает преимуществами в плане безопасности по сравнению с керосином. При утечке он быстро испаряется и поднимается вверх, поэтому не скапливается и не создает очагов возгорания на земле, как керосин. Однако водород обладает более широким диапазоном воспламеняемости, что облегчает его воспламенение. Сертификация водородных самолетов требует тщательного обнаружения утечек, изоляции от источников воспламенения и обеспечения безопасности конструкции [17,18].

С точки зрения климата, водородные самолеты будут иметь значительно меньшее воздействие, чем обычные самолеты, если водород будет производиться с использованием возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра, солнца или атомная энергия. Самолеты, работающие на водороде, не выделяют углекислый газ и могут снизить или вовсе исключить выбросы NOx, в зависимости от силовой установки. Влияние стойких инверсионных следов и перистых завихрений все еще остается неопределенным. Однако, по последним оценкам, их воздействие будет меньше, чем воздействие инверсионных следов и перистых завихрений от самолетов, работающих на керосине. Прогнозируемое снижение воздействия перистого инверсионного следа обусловлено тем, что выхлопные газы, образующиеся при сжигании водорода, не содержат сажи

или сульфатов, которые изменяют свойства кристаллов инверсионного льда и способствуют потеплению климата [17,18].

Необходимо еще раз подчеркнуть, абсолютно негативным фактором, связанным с использованием авиации в высоких Арктических широтах, являются выбросы вредных веществ в атмосферу. Большую часть этих выбросов составляют окислы азота и твердые частицы, индексы эмиссии которых прямо пропорциональны возрастанию тяги двигателей. Это характерно для крейсерских полетов на эшелоне воздушных судов. Напротив, индексы эмиссии угарного газа и углеводородов обратно пропорциональны тяге двигателей, вследствие чего масса выбросов этих элементов в высоких слоях атмосферы почти такая же, как в зоне аэропортов.

Воздействие инверсионных следов также может быть уменьшено за счет направления полетов в районы, где, вероятно, образуются стойкие инверсионные следы. Несмотря на то, что самолеты с водородными двигателями производят больше водяного пара, ожидается, что его прямые выбросы (за исключением инверсионных следов), особенно на высоте менее 8км, не окажут значительного влияния на климат [15].

С точки зрения экономики стоимость водородных самолетов до сих пор неизвестна, хотя большинство исследований предсказывают более высокие эксплуатационные расходы, чем у современных самолетов. Некоторое увеличение стоимости связано с более высокими расходами на приобретение и техническое обслуживание, связанными с хранением водорода. Более легкие баки жидкообразного водорода LH_2 помогают сократить количество потребляемого самолетом топлива. Известно, что стоимость электроэнергии доминирует над удельной стоимостью экологически чистого водорода. При этом, тенденция к снижению цен на возобновляемую электроэнергию приведет к снижению стоимости экологически чистого водорода. Увеличение же масштабов производства экологически чистого водорода также приведет к снижению удельной стоимости. Однако сами по себе эти изменения могут не сделать "зеленый " водород конкурентоспособным по стоимости с керосином в ближайшем будущем [15].

Применение жидкого водорода в авиации сейчас технически осуществимо. Внедрение этого вида топлива станет новым этапом развития воздушного транспорта. Для реализации подобных проектов требуется комплексный подход, позволяющий решать большое количество задач, связанных с новым видом топлива.

Крайне важным этапом выбора криогенного топлива является анализ его теплофизических и термодинамических свойств [7]. Основные свойства топлив приведены в таблице.

Таблица – Основные свойства топлив

	Показатель	Значение			
		ТС-1 (керосин)	СПГ (метан)	Водород	Пропан
1	Плотность, кг/м^3 (при температуре, К)	778,6 (288)	424,7 (111)	71,5 (20)	580,0 (230)
2	Теплотворность МДж/м^3	43,5	50,0	120,0	45,9
3	Энергоемкость МДж/м^3	33855	21100	8450	26620
4	Хладоресурс, кДж/кг	1330	2830	13030	3180
5	Газовая постоянная, Дж/кгК	57,42	518,26	4124,42	115,24
6	Диапазон жидкой фазы, К (при давлении 0,1 Мпа)	эксплуатационный	91…111	14…20	96…230

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что из всего множества криогенных топлив, жидкий водород наиболее подходит для использования в авиации. В статье были рассмотрены как позитивные, так и негативные стороны применения водорода в качестве топлива. Благодаря меньшему удельному весу жидкого водорода по сравнению с авиакеросином, можно снизить взлетный вес летательного аппарата примерно на треть. Однако габаритные размеры воздушного судна увеличатся, т.к. для водорода требуются топливные баки большего объема. Высокая стоимость водорода нивелируется его небольшим расходом, благодаря большой теплотворности. Крайне низкая температура кипения водорода так же создает серьезные сложности при его хранении и транспортировке. Резюмируя все вышесказанное, можно уверенно сказать, что водородное топливо является перспективным направлением развития мировой энергетики, однако требует решения серьезных инженерных задач. Гарантией успешного решения всех технических задач в развитии авиации является активное участие не только государства, но и крупного бизнеса. Для Российской Федерации, реализующей масштабные проекты освоения природных ресурсов Арктики, развитие Полярной авиации становится стратегически необходимым условием. Без создания экологически чистых силовых установок на основе водородного топлива невозможно обеспечить устойчивое и безопас-

ное использование Северного морского пути и повышение конкурентоспособности России в высоких широтах.

Заключение

В настоящее время водород во всём мире рассматривается в качестве технически реализуемого и перспективного энергоносителя, способного стать основой для следующего этапа развития авиационной отрасли.

Необходимо признать, что переход на воздушные перевозки на водородных двигателях не однозначен так как требует решения многих сложных технологических задач, что в свою очередь подразумевает значительные инвестиции в развитие новых технологий для преодоления технически сложно решаемых проблем создания, прежде всего безопасных, принципиально новых воздушных судов и двигателей. Частные компании и проекты, финансируемые правительством, ограничиваются разработкой прототипов и их летными испытаниями. Но для достижения окончательного успеха требуется больше финансирования и передовых инженерных разработок с консолидацией усилий всей отрасли, что могло бы привести авиацию к разработкам совместимыми с требованиями по бережливому отношению к окружающей среде, когда появление самолетов с двигательными установками на водородном топливе могло бы стать массовым явлением, а авиация с летательными аппаратами с нулевым уровнем выбросов будет идти в ногу с климатом будущего.

Список литературы

1. Горбунов, В. П. Самолет и холод. Климатические испытания и эксплуатация воздушных судов в условиях экстремально низких температур, Арктики, Сибири и Крайнего Севера: монография / В. П. Горбунов. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 712 с.

2. Transpolar Flight Routes: Flying Over the Top of the World (2026). – URL: https://myflightroutes.com/blog/transpolar-flight-routes (Дата обращения 04.09.2026).

3. Разносчиков В. В., Чепанов А. И. Анализ использования криогенных и газовых топлив в силовых установках магистральных самолётов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиаци. – 2008. – № 134. – С. 10–15.

4. Экология, энергетика, энергосбережение: бюллетень / под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва: ПАО «Мосэнерго», 2023. — ISBN 978-5-383-01681-7.

5. Росляков П. В. Особенности сжигания и транспортировки водородсодержащих газов / П. В. Росляков // Экология, энергетика, энергосбережение: Информационно-аналитический бюллетень ПАО «Мосэнерго»; под ред. А. В. Клименко. – Вып. 4. – Москва, 2023. – 42 с.

6. Занять свою нишу. Водород. Санкт-Петербург. Коммерсант. 2023. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/5928520?ysclid=mtoj4j1jyt828231684 (Дата обращения 04.09.2026).

7. Краев, В. М. Экономическая эффективность применения криогенных топлив в авиации / В. М. Краев // Московский экономический журнал. – 2020. – № 11. – С. 699-712.

8. Кирдюшкин, Ю. С. Потенциал водородного топлива гражданской авиации будущего / Ю. С. Кирдюшкин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 194. – С. 110–114.

9. Водород как топливо для авиации. Project Bee. США.1955 год // Авиация и Техника. – URL: https://pikabu.ru/ (Дата обращения 3.09.2026).

10. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. – URL: https://www. airbus.com / en / newsroom / press - releases / 2020 - 09 - airbus - reveals-new-zero-emission-concept-aircraft (Accessed 03.09. 2026.) Airbus. Sept. 2020. – pp. 6, 12, 19, 34.

11. Замена самому популярному пассажирскому самолету в мире: Airbus eAction выйдет во второй половине 2030-х и не получит водородный двигатель. – URL: https://www.ixbt.com/news/2026/06/28/airbus-eaction-2030.html. (Дата обращения 05.09.2026).

12. Jens Flottau, Robert Wall. Why Airbus CEO Is Bullish On Launching A320 Replacement in 2030 June 25, 2026. – URL: https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/interview-why-airbus-ceo-bullish-launching-a320-replacement-2030 (Дата обращения 05.09.2026).

13. David Debney et al. Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts. FlyZero report FZO-AIN-REP-0007. Aerospace Technology Institute, Mar. 2022. pp. 6, 19, 34.

14. Clean Sky 2 Joint Undertaking and Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Report. Publications Office of the European Union, 2020. doi: 10.2843/471510. pp. 4, 6, 9, 19, 33, 35, 36, 40.

15. Eytan J. Adler, Joaquim R. R. A. Martins. (2023). Hydrogen-Powered Aircraft: Fundamental Concepts, Key Technologies, and Environmental Impacts Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

16. Kumar, N.R.S., Suryan, A., Manju, M.S. (2024). Hydrogen As An Alternative Aviation Fuel—A Review. In: Kumar, S., Agarwal, A.K., Khandelwal, B., Singh, P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0507-8_12.

17. Филипов С., Голодницкий А., Кашин А. Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. № 11 (153). – 2020. – С. 28-39.

18. Козлов А. В., Теренченко А. С. Математическая модель водородного топливного элемента // Транспорт на альтернативном топливе. – № 3 (87). – 2022. – С. 42-52.

19. Палкин, В. А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации / В. А. Палкин // Авиационные двигатели. – № 4 (13). – 2021. – С. 63-84.

20. Разносчиков В. В., Резников М. Е. Методика ЭИМ (эксергия – импульс - масса) предварительной оценки транспортной технической системы «ЛА-СУ-Т» (летательный аппарат - силовая установка - топливо) // XXVI научные чтения по космонавтике. – М.: ИИЕТ РАН, 2002.

References

1. Gorbunov, V. P. Aircraft and Cold. Climatic Testing and Operation of Aircraft in Extremely Low Temperatures, the Arctic, Siberia, and the Far North: a monograph / V. P. Gorbunov. – St. Petersburg: High-Tech Technologies, 2023. – 712 p.

2. Transpolar Flight Routes: Flying Over the Top of the World (2026). – URL: https://myflightroutes.com/blog/transpolar-flight-routes (Date of access: 04.09.2026).

3. Raznoschikov V. V., Chepanov A. I. Analysis of the use of cryogenic and gaseous fuels in power plants of mainline aircraft // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2008. – No. 134. – pp. 10–15.

4. Ecology, Energy, Energy Saving: Bulletin / edited by Academician of the Russian Academy of Sciences A.V. Klimenko. — Moscow: PJSC “Mosenergo”, 2023. — ISBN 978-5-383-01681-7.

5. Roslyakov, P. V. Features of Combustion and Transportation of Hydrogen-Containing Gases / P. V. Roslyakov // Ecology, Energy, and Energy Conservation: Information and Analytical Bulletin of PJSC Mosenergo; edited by A. V. Klimenko. – Issue 4. — 2023. — 42 p.

6. Find your niche. Hydrogen. Saint-Petersburg. Kommersant. 2023. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/5928520?ysclid=mtoj4j1jyt828231684 (Date of access: 04.09.2026).

7. Kraev, V. M. Economic efficiency of using cryogenic fuels in aviation / V. M. Kraev // Moscow Economic Journal. – No. 11. – 2020. – pp. 699-712.

8. Kirdyushkin, Yu. S. The potential of hydrogen fuel for civil aviation of the future / Yu. S. Kirdyushkin // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2013. – No. 194. – pp. 110-114.

9. Hydrogen as a fuel for aviation. Project Bee. USA. 1955 // Aviation and Technology. – URL: https://pikabu.ru/ (Accessed on 03.09.2026).

10. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. – URL: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft (Accessed on 03.09.2026.) Airbus. Sept. 2020. – pp. 6, 12, 19, 34.

11. A replacement for the world’s most popular passenger aircraft: the Airbus eAction will be released in the second half of the 2030s and will not feature a hydrogen engine. – URL: https://www.ixbt.com/news/2026/06/28/airbus-eaction-2030.html (Date of access: 05.09.2026).

12. Jens Flottau, Robert Wall. Why Airbus CEO Is Bullish On Launching A320 Replacement in 2030 June 25, 2026. – URL: https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/interview-why-airbus-ceo-bullish-launching-a320-replacement-2030 (Date accessed 05.09.2026).

13. David Debney et al. Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts. FlyZero report FZO-AIN-REP-0007. Aerospace Technology Institute, Mar. 2022. pp. 6, 19, 34.

14. Clean Sky 2 Joint Undertaking and Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2000. Report. Publications Office of the European Union, 2020. doi: 10.2843/471510. pp. 4, 6, 9, 19, 33, 35, 36, 40.

15. Eytan J. Adler, Joaquim R. R. A. Martins. (2023). Hydrogen-Powered Aircraft: Fundamental Concepts, Key Technologies, and Environmental Impacts Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

16. Kumar, N.R.S., Suryan, A., Manju, M.S. (2024). Hydrogen As An Alternative Aviation Fuel—A Review. In: Kumar, S., Agarwal, A.K., Khandelwal, B., Singh, P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0507-8_12.

17. Filipov S., Golodnitsky A., Kashin A. Fuel Cells and Hydrogen Energy // Energy Policy. No. 11 (153). 2020. Pp. 28–39.

18. Kozlov A. V., Terenchenko A. S. Mathematical model of a hydrogen fuel cell // Transport using alternative fuels. No. 3 (87). 2022. Pp. 42–52.

19. Palkin, V. A. Review of foreign research on the use of alternative fuels in aviation / V. A. Palkin // Aircraft engines. – No. 4 (13). – 2021. – Pp. 63–84.

20. Raznoschikov V. V., Reznikov M. E. The EIM (exergy–impulse–mass) methodology for preliminary assessment of the “LA-SU-T” (aircraft — propulsion system — fuel) transport technical system // XXVI Scientific Readings on Cosmonautics. – Moscow: IET RAS, 2002.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_33-41
УДК 620.17:669.7

Колосов К. С.
студент автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Новиков А.П.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Kolosov K.S.
student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doktor of technical sciences, professor, department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Novikov A.P.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

INCREASING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYMER MATERIALS BY THE METHOD OF MAGNETIC ORIENTATION OF DISPERSED FILLERS: PROSPECTS FOR THE TRANSPORT INDUSTRY

Аннотация. В статье рассматривается инновационный подход к созданию полимерных композитов с повышенной теплопроводностью, в основе которого лежит ориентация ферромагнитных дисперсных наполнителей в постоянном магнитном поле. Раскрыты физико-химические основы данного метода, включая механизмы формирования упорядоченных структур при введении ферромагнитных частиц в вязкую полимерную матрицу до её отверждения. Описаны технологические этапы получения ориентированных композитов: приготовление смеси полимерной матрицы и наполнителя, помещение её в магнитное поле заданной напряжённости, контроль условий ориентации и последующее отверждение с сохранением сформированной структуры.

Abstract. The article discusses an innovative approach to the creation of polymer composites with increased thermal conductivity, which is based on the orientation of ferromagnetic dispersed fillers in a permanent magnetic field. The physico-chemical foundations of this method are disclosed, including the mechanisms of formation of ordered structures when ferromagnetic particles are introduced into a viscous polymer matrix before it cures. The technological stages of obtaining oriented composites are described: preparation of a mixture of a polymer matrix and filler, placing it in a magnetic field of a given strength, control of orientation conditions and subsequent curing while maintaining the formed structure.

Ключевые слова: полимерные композиты; теплопроводность; ферромагнитные наполнители; магнитная ориентация; анизотропия теплопроводности; транспортные системы; терморегулирование.

© Колосов К. С., Прядкин В. И., Новиков А. П., 2026

Keywords: polymer composites; thermal conductivity; ferromagnetic fillers; magnetic orientation; anisotropy of thermal conductivity; transport systems; thermal regulation

Введение

К современным транспортным средствам предъявляются всё более высокие требования к материалам, применяемым в их конструкции (рис. 1). Указанные требования формируются под влиянием целого ряда факторов: необходимости повышения топливной экономичности, роста нагрузок на узлы и агрегаты, ужесточения норм безопасности и экологичности, а также стремления к снижению совокупных затрат на производство и эксплуатацию. К числу актуальных задач в этой области относится снижение массы узлов и агрегатов, необходимое для уменьшения общей массы транспортного средства и улучшения его технических характеристик без ущерба для надёжности.

Для решения указанных задач в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к широкому применению полимерных композитных материалов. Обладая высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью переработки, такие материалы позволяют существенно облегчить конструкцию при сохранении требуемых эксплуатационных показателей. Однако их низкая теплопроводность ограничивает применение в узлах, подверженных интенсивному нагреву, поскольку недостаточный теплоотвод может приводить к локальному перегреву деталей, ускоренной деградации материала и, как следствие, к снижению надёжности и ресурса изделия.



Рисунок 1 – Различные детали и элементы автомобиля

Традиционные методы повышения теплопроводности полимерных композитов, к числу которых относится введение углеродных или металлических наполнителей, не всегда обеспечивают требуемую однородность свойств мате-

риала. Неравномерное распределение наполнителя в объёме полимерной матрицы приводит к тому, что теплопроводность детали оказывается неодинаковой на различных её участках. Это создаёт условия для возникновения локальных зон с пониженным теплоотводом, в которых происходит накопление тепла и, как следствие, перегрев отдельных областей детали. Подобная неравномерность теплового поля способствует ускоренной деградации материала в наиболее нагретых зонах, возникновению термических напряжений и в конечном итоге может привести к выходу детали из строя.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов направленного формирования структуры композита, позволяющих создавать однородную структуру и целенаправленно управлять теплофизическими характеристиками материала. Подобные методы должны обеспечивать не только повышение средней теплопроводности композита, но и её равномерное распределение по объёму изделия, что особенно важно для деталей, работающих в условиях интенсивного и неравномерного нагрева.

Одним из перспективных направлений решения указанной задачи является ориентация ферромагнитных дисперсных частиц в полимерной матрице с помощью внешнего магнитного поля. Сущность подхода состоит в том, что ферромагнитные частицы, введённые в полимерную матрицу, под действием магнитного поля выстраиваются упорядоченно, образуя направленные структуры. Такой подход позволяет создавать анизотропные структуры с повышенной теплопроводностью вдоль направления ориентации, поскольку теплопередача в этом направлении осуществляется не только через полимерную матрицу, но и по цепочкам частиц, играющих роль тепловых «мостиков».

Формируемая анизотропия теплофизических свойств открывает новые возможности для проектирования элементов транспортных систем. Появляется возможность целенаправленно задавать направление преимущественного теплоотвода, концентрируя его именно в тех зонах, где наблюдается наиболее интенсивный нагрев, и одновременно сохраняя низкую теплопроводность в поперечном направлении, что может быть использовано для локального терморегулирования. Тем самым обеспечивается более рациональное распределение тепловых потоков в конструкции при минимальном увеличении её массы.

Физико-химические основы метода

В основе рассматриваемого метода лежит способность ферромагнитных частиц, например порошков железа, никеля или их сплавов, ориентироваться

вдоль линий магнитного поля при введении в вязкую полимерную матрицу до её отверждения (рис. 2). Физическая природа данного явления обусловлена взаимодействием магнитного момента частиц с внешним полем: под его действием частицы приобретают вращательный момент и стремятся занять положение, соответствующее минимуму магнитной энергии, то есть ориентироваться вдоль силовых линий поля.

Поскольку полимерная матрица на стадии введения наполнителя находится в вязком, неотверждённом состоянии, она не препятствует перемещению и развороту частиц, но при этом обеспечивает достаточное сопротивление, чтобы зафиксировать их положение после снятия поля или завершения полимеризации. В результате после отверждения формируется упорядоченная структура, в которой частицы образуют цепочки или плоскости, ориентированные по направлению поля. Такая структура сохраняется в готовом композите и определяет его теплофизические и механические характеристики.

Существенно, что характер формируемых структур зависит от ряда параметров: концентрации и дисперсности наполнителя, вязкости матрицы, напряжённости магнитного поля и продолжительности его воздействия. Варьирование указанных параметров позволяет целенаправленно управлять степенью упорядоченности и, как следствие, свойствами получаемого материала.

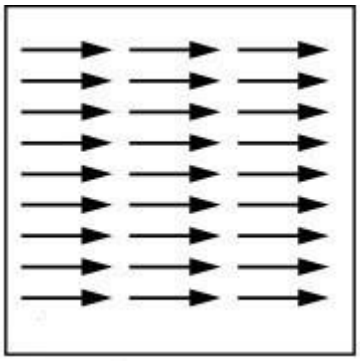


Рисунок 2 – Ферромагнитное вещество
(атомы находятся в упорядоченном состоянии)

Это приводит к значительному увеличению эффективной теплопроводности композита вдоль направления ориентации. Причина состоит в том, что теплопередача в данном направлении осуществляется не только через полимерную матрицу, обладающую низкой теплопроводностью, но и по «мостикам» из металлических частиц, образующих непрерывные цепочки. Поскольку теплопроводность металлов на несколько порядков превышает теплопроводность поли-

мера, именно эти цепочки становятся основными каналами переноса тепла и определяют высокие значения эффективной теплопроводности вдоль направления ориентации.

При этом теплопроводность в поперечном направлении остаётся низкой, так как между соседними цепочками частиц сохраняются прослойки полимерной матрицы, препятствующие переносу тепла. Возникающая анизотропия теплопроводности может быть полезна для локального терморегулирования: материал способен интенсивно отводить тепло в заданном направлении, одновременно ограничивая его распространение в перпендикулярном направлении. Такое сочетание свойств открывает возможность целенаправленного управления тепловыми потоками в конструкции без существенного увеличения её массы.

Технологические аспекты

Процесс получения ориентированных композитов включает ряд последовательных этапов, каждый из которых оказывает существенное влияние на конечную структуру и свойства материала:

Подготовка смеси полимерной матрицы и ферромагнитного наполнителя. На данном этапе обеспечивается равномерное распределение частиц наполнителя в объёме полимера. Концентрация наполнителя, как правило, составляет 10–30 % по объёму. Указанный диапазон является компромиссным: при меньшем содержании частиц не удаётся сформировать непрерывные теплопроводящие цепочки, а при большем — возрастает вязкость смеси и ухудшается её технологичность.

Помещение смеси в магнитное поле заданной напряжённости. Напряжённость поля варьируется в пределах от 0,1 до 1 Тл. Воздействие поля осуществляется до начала или в процессе полимеризации, то есть в тот период, когда матрица сохраняет достаточную подвижность для ориентации частиц. Величина напряжённости определяет силу, действующую на частицы, и, соответственно, степень их упорядоченности.

Контроль времени и условий ориентации. Продолжительность воздействия поля и температурные условия процесса подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальную упорядоченность структуры. Недостаточное время ориентации не позволяет частицам занять оптимальное положение, тогда как избыточное может привести к нежелательному укрупнению цепочек и неравномерности их распределения.

Отверждение композита с сохранением ориентированной структуры. На завершающем этапе происходит полимеризация матрицы, в результате которой сформированная упорядоченная структура фиксируется. Важно, чтобы режим отверждения не приводил к нарушению ориентации частиц, достигнутой на предыдущем этапе.

Важным преимуществом метода является возможность управления степенью анизотропии теплопроводности за счёт изменения напряжённости поля, концентрации и типа наполнителя. Это позволяет целенаправленно проектировать материалы с заданным соотношением теплопроводности в продольном и поперечном направлениях, адаптируя их под конкретные условия эксплуатации.

Перспективы применения в транспортной отрасли

К транспортным средствам с каждым годом предъявляются всё более жёсткие требования в части безопасности и повышения надёжности, при этом недопустимо удорожание производства. Указанное противоречие — необходимость одновременного улучшения эксплуатационных характеристик и сохранения экономической доступности — требует поиска новых конструкционных и материальных решений. В качестве примера можно привести технику, предназначенную для сил специального назначения, где используются облегчённые конструкции и высоконагруженные узлы, такие как двигатели, электроника и тормозные системы. Применение ориентированных полимерных композитов в подобных изделиях позволяет:

– существенно повысить эффективность теплоотвода от критических элементов без увеличения массы конструкции, что особенно важно для узлов, работающих в условиях интенсивного нагрева;

– обеспечить локальное терморегулирование за счёт анизотропии теплопроводности, направляя тепловые потоки в заданные зоны и ограничивая их распространение в нежелательных направлениях;

– снизить тепловую нагрузку на агрегаты и тем самым повысить их надёжность и ресурс;

– использовать композиты для изготовления корпусов, панелей, радиаторов и других элементов транспортных средств, расширяя номенклатуру деталей, изготавливаемых из полимерных материалов.

Особую актуальность внедрение подобных материалов приобретает для отечественных разработок, таких как высокопроходимый транспортёр «Пла-

стун-ТТ» (рис. 3), где вопросы снижения массы и повышения надёжности стоят особенно остро.



Рисунок 3 – Транспортёр «Пластун-ТТ» высокой проходимости

Вместе с тем применение таких композитов важно и для массового потребителя: сокращение массы и улучшение теплопроводности многократно улучшают потребительские свойства выпускаемой продукции, повышая её конкурентоспособность. Использование полимерных композитов с управляемой теплопроводностью позволит создать унифицированное семейство машин с улучшенными эксплуатационными характеристиками, пригодное для различных условий эксплуатации.

Выводы

Проведённый анализ показывает, что метод магнитной ориентации ферромагнитных дисперсных наполнителей в полимерной матрице открывает новые горизонты для создания материалов с заданными теплофизическими свойствами. В отличие от традиционных способов повышения теплопроводности, основанных на простом введении наполнителей, рассматриваемый подход обеспечивает направленное формирование структуры композита и позволяет целенаправленно управлять его теплофизическими характеристиками, в том числе степенью анизотропии теплопроводности.

Установлено, что управление свойствами материала достигается за счёт варьирования напряжённости магнитного поля, концентрации и типа ферро-

магнитного наполнителя, а также условий проведения ориентации и отверждения. Это создаёт предпосылки для проектирования материалов, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации, включая узлы, подверженные интенсивному и неравномерному нагреву.

Внедрение рассмотренного метода в транспортную отрасль способствует развитию современных транспортных систем, повышению их эффективности, надёжности и конкурентоспособности на мировом рынке. Применение ориентированных полимерных композитов позволяет одновременно решать задачи снижения массы конструкции и обеспечения эффективного теплоотвода, что особенно важно для высоконагруженных узлов и техники, эксплуатируемой в экстремальных климатических условиях.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию технологических режимов, расширение ассортимента используемых материалов и масштабирование производства для нужд транспортной индустрии. Решение указанных задач позволит перейти от лабораторных образцов к серийному выпуску изделий с управляемой теплопроводностью и создать унифицированное семейство транспортных средств с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Попов В.М., Новиков А.П., Кондратенко И.Ю. Метод повышения теплопроводности тонкослойных полимерных материалов // Материалы Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. — М., 2002. — Т. 7. — С. 224–225.

2 Попов В.М., Новиков А.П. К вопросу о повышении теплопроводности тонкослойных полимерных материалов // Вестник ВГТУ, серия «Энергетика». — 2002. — Вып. 7.2. — С. 120–122.

3. Остроушко М.Н. Клеевые соединения металлических конструкций с повышенной теплопроводностью // Материалы международной молодёжной научной конференции. — Казань, 2005. — Т. 1. — С. 119–120.

4. Попов В.М., Остроушко М.Н. Теплопроводность полимерных композиционных материалов, обработанных в постоянном электрическом поле // Вестник ВГТУ. — 2007.

5. Болотина К.С., Спивак В.С., Иванов Д.А. Оптимизация технологии изготовления дисперсно наполненных полимерных структур и тепловыделяющих элементов на их основе // Тезисы докладов 3-й Всесоюзной конференции по механике неоднородных структур. — Львов, 1991. — С. 36.

6. Влияние переменного магнитного поля на кинетику отверждения наполненных композитов / К.С. Болотина, А.Н. Варава, Д.А. Иванов и др. // Сборник трудов Московского энергетического института. — 1989. — Вып. 216. — С. 84–90.

7. Зубов П.И., Сухарева Л.А., Смирнова Ю.П. Влияние внутренних напряжений на долговечность полимерных покрытий // Доклады АН СССР. — 1963. — Т. 150, № 2. — С. 238–241.

8. Баженов, Е. Е. Границы применимости стандартного метода оценки крутильной жесткости пространственных рам автомобилей багги / Е. Е. Баженов, С. К. Буйначев, А. Н. Кустовский // Известия МГТУ МАМИ. – 2018. – № 4(38). – С. 55-60. – EDN YTOFSX.

References

1. Popov V.M., Novikov A.P., Kondratenko I.Yu. A method for increasing the thermal conductivity of thin-layer polymer materials // Proceedings of the Third Russian National Conference on Heat Transfer. — Moscow, 2002. — Vol. 7. — Pp. 224–225.

2. Popov V.M., Novikov A.P. On the issue of increasing the thermal conductivity of thin-layer polymer materials // Vestnik VGTU, series “Energy”. — 2002. — Issue 7.2. — Pp. 120–122.

3. Ostroushko M.N. Adhesive joints of metal structures with increased thermal conductivity // Proceedings of the International Youth Scientific Conference. — Kazan, 2005. — Vol. 1. — Pp. 119–120.

4. Popov V.M., Ostroushko M.N. Thermal conductivity of polymer composite materials processed in a constant electric field // Vestnik VGTU. — 2007.

5. Bolotina K.S., Spivak V.S., Ivanov D.A. Optimization of the technology for manufacturing dispersed-filled polymer structures and heat-generating elements based on them // Abstracts of the 3rd All-Union Conference on the Mechanics of Inhomogeneous Structures. — Lviv, 1991. — P. 36.

6. The effect of an alternating magnetic field on the curing kinetics of filled composites / K.S. Bolotina, A.N. Varava, D.A. Ivanov, et al. // Collection of works of the Moscow Energy Institute. — 1989. — Issue 216. — Pp. 84–90.

7. Zubov P.I., Sukhareva L.A., Smirnova Yu.P. The influence of internal stresses on the durability of polymer coatings // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. — 1963. — Vol. 150, No. 2. — Pp. 238–241.

8. Bazhenov, E. E. Limits of applicability of the standard method for assessing the torsional stiffness of spatial frames of buggy vehicles / E. E. Bazhenov, S. K. Buynachev, A. N. Kustovsky // Izvestiya MGTU MAMI. — 2018. — No. 4(38). — Pp. 55–60. – EDN YTOFSX.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_42-52
УДК 629.33.028

Колыхалова А.А.
студент 4 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Рубцов Е.Г.
преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Школьных А.В.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Kolykhalova A.A.
4th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Rubtsov E.G.
lecturer at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Shkolnykh A.V.
assistant at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doktor of technical sciences, professor, department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ АВТОМОБИЛЕЙ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

ELECTRIC POWER MOTORS OF CARS: DESIGN FEATURES AND WAYS OF IMPROVEMENT

Аннотация. В статье описаны различные конструкции двигателей легковых и грузовых электромобилей, особое внимание уделено системе охлаждения. Помимо этого, были приведены характеристики различных типов электродвигателей и их сравнение с бензиновыми двигателями. Помимо этого, в статье ещё описана история появления электромобилей в России и за рубежом.

Abstract. The article describes various engine designs for passenger cars and electric trucks, with special attention paid to the cooling system. In addition, the characteristics of various types of electric motors and their comparison with gasoline engines were given. In addition, the article also describes the history of the emergence of electric vehicles in Russia and abroad.

Ключевые слова: автомобиль, электрокар, экология, транспорт, инвертор, ротор, статор, система управления.

Keywords: car, electric car, ecology, transport, inverter, rotor, stator, control system.

Введение

Электрические автомобили в 2025 году всё больше и больше заполняют улицы городов России и возникает вопрос об их сути. Какие потенциальные опасности они несут за собой? Электродвигатель, являясь технологическим

© Колыхалова А. А., Рубцов Е. Г., Школьных А. В., Прядкин В. И., 2026

сердцем автомобиля новой эры, олицетворяет собой ключевой тренд в развитии транспорта — стремление к эффективности, экологичности и интеллектуализации.

Первые упоминания электрических транспортных средств датируются началом 19 века. В эпоху роста транспортной активности и необходимости в передвижении объединение учёных из разных стран ставили эксперименты по созданию электрических повозок – самоходных карет, главной движущей тягой которых выступали подобия электродвигателей на основе неперезаряжаемых гальванических элементах или на свинцово-кислотных аккумуляторах. В силу многостороннего развития автомобилестроения в те годы концепции электрических автомобилей не вызывали интереса к совершенствованию. Вследствие этого разработки были отложены практически на 2 века. В конце 1970-х годов из-за нефтяных кризисов начался поиск альтернативных видов топлива, и ученые возобновили изучение в этой области. В 2008 году компания Tesla впервые представила свой электромобиль под названием Roadster, основой которого являлся литий-ионный аккумулятор. Сегодня развитием направления электрокаров занимаются все крупные бренды автомобилей, такие как – Nissan, BMW, Volkswagen и др.

История создания электромобилей

В 1842 году Роберт Андерсон и Томас Дэвенпорт изготовили совершенные электромобили с питанием от перезаряжающихся батарей – аккумуляторов. Через десять лет появились аналогичные конструкции Чарльза Пэйджа и братьев Студебекер – Генри и Клема. Но, развитие электромобилей шло очень медленно, так как создатели электромобилей решались только на робкие попытки внедрения своих разработок. На рубеже XIX и XX веков в развитие автомобилестроения вмешались политики и общественность. Все вспомнили про экологию и начали пропагандировать электромобили. Автомобили на электротяге продвигали учёные в своих научных работах. Власти некоторых городов частично финансово поддерживали внедрение электромобилей для общественных перевозок. В 1890-х годах прокатные автомобили появились в Филадельфии и в Нью-Йорке, и в начале XX века начали распространяться на всей территории США.

Что касается России, то здесь строительство электромобилей началось по причине повышения безопасности на дорогах из-за того, что ДВС пугали своим шумом жителей и лошадей. В 1899 году предприниматель И. В. Романов создал

свой первый автомобиль на электротяге (рис. 1). Масса электромобиля составляла 750 кг, из которых половина приходилась на элементы питания. Зарядки аккумуляторов системы Бари, усовершенствованных Романовым, хватало на 60 вёрст пути при расчётной скорости движения 15 вёрст в час – согласно действующих в то время требований городской управы Петербурга, допускавших движение самоходов не быстрее 13 вёрст в час. Максимальная же скорость могла доходить до 35 вёрст в час. Мощность электромомотора составляла 1 киловатт.

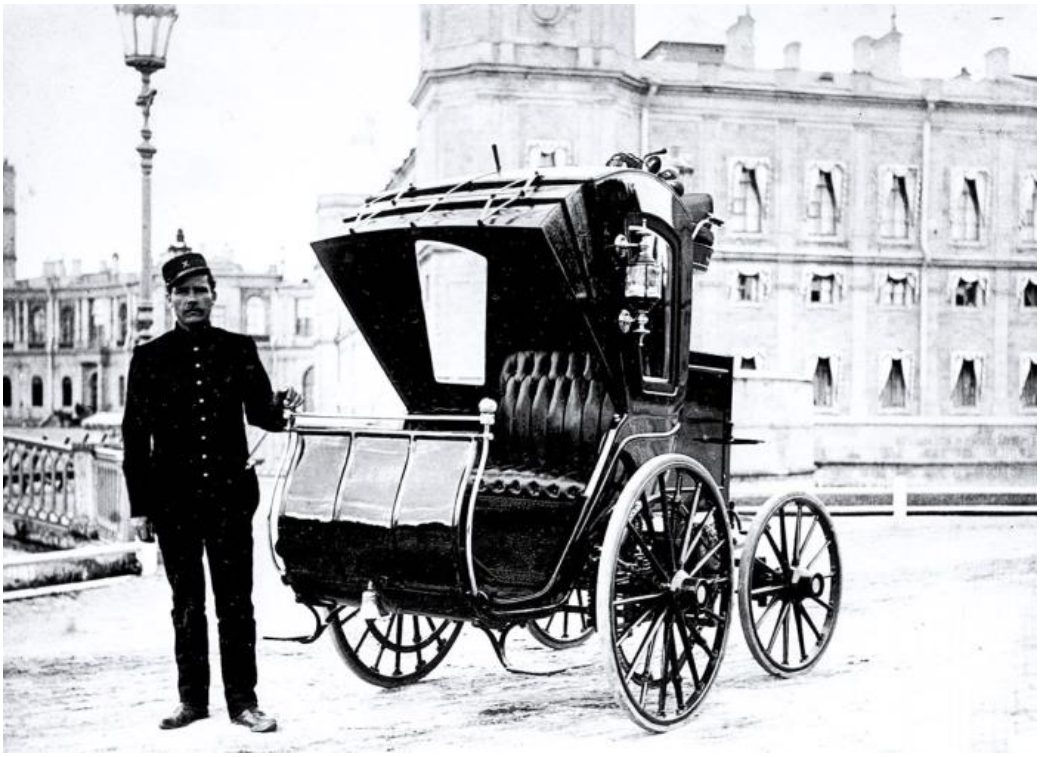


Рисунок 1 – Первый электромобиль И. В. Романова

Силовая установка располагалась в средней части экипажа, каждый двигатель передавал вращение на одно из передних колёс при помощи роликовой цепи по принципу раздельного привода. Отсек для батарей располагался за салоном, над ним находилось место водителя. Для замедления и остановки экипажа служили два тормоза – механический и электрический рекуперационный. При торможении он принуждал двигатель работать как генератор и вырабатывать энергию, идущую на подзарядку аккумуляторов. Предусматривалось и экстренное торможение при помощи «стоп-крана», который прерывал ток в главной цепи и мог быть приведён в действие как водителем, так и пассажирами. Регулирование скорости движения осуществлялось девятиступенчатым

реостатом-контроллером. Предназначался электромобиль для извоза в качестве прокатной машины.

Конструкции силовых установок электромобилей

Проанализируем различные варианты тяговых электродвигателей легковых автомобилей.

Для начала рассмотрим силовую установку американского электромобиля Tesla Model S в комплектации P100D. Здесь производитель устанавливает моторы двух различных типов. Электродвигатель первого типа имеет редукторную часть с одного края и выдаёт максимальную мощность 193 кВт. На электродвигателе второго типа редукторная часть находится по центру, этот двигатель уже выдаёт 375 кВт. На данные электромоторы (рис. 2) устанавливается ротор с медной обмоткой типа «беличья клетка». В то время, как производители электродвигателей для автомобилей классом ниже используют обычный алюминиевый ротор. Вместо коробки передач применяется редуктор с цилиндрическими прямозубыми шестернями с передаточным числом 11,39.

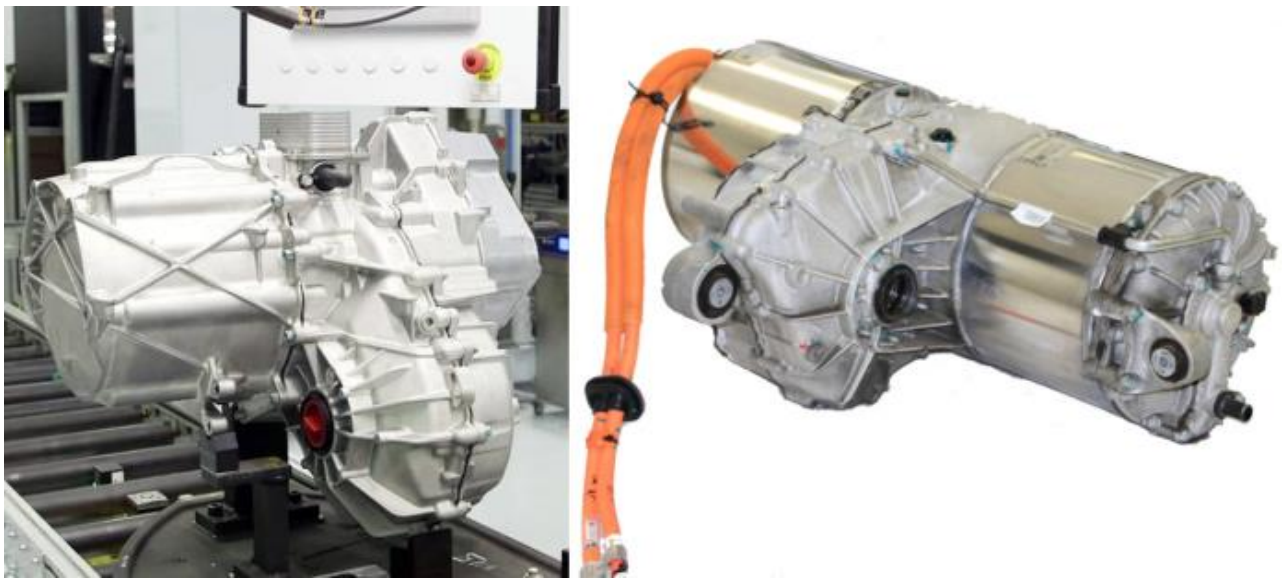


Рисунок 2 – Типы электродвигателей Tesla

Что касается компоновки, то у американцев на каждой оси установлено по своему тяговому электромотору на алюминиевом подрамнике. На более дорогой комплектации менее мощный мотор установлен на передней оси, более мощный на задней оси. На более бедных комплектациях производитель применяет другое расположение электродвигателей (рис. 3).

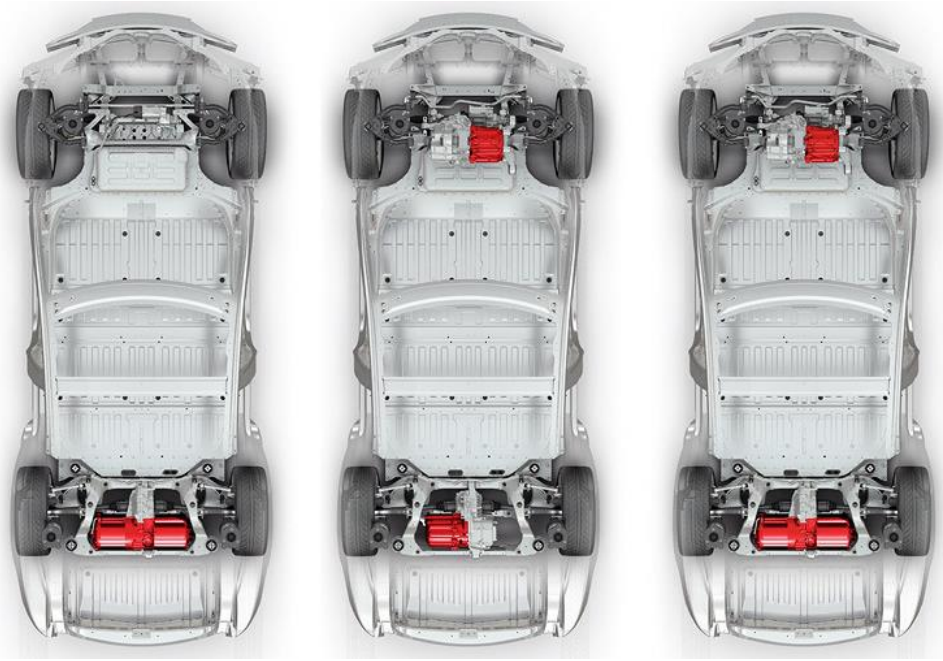


Рисунок 3 – Различные компоновки силовых установок Tesla

Теперь рассмотрим силовую установку на примере электромобиля Evolute i-Joy, производящегося в Липецкой области на заводе «Моторинвест». Под капотом отечественного электромобиля установлен инвертор, преобразующий постоянный ток от батареи в переменный. Помимо этого, установлено ещё и бортовое зарядное устройство, преобразующее для батареи переменный ток от зарядного устройства в постоянный. Основная батарея (рис. 4) здесь установлена типа Li-NMC (литий-никель-марганец-кобальт) ёмкостью 53 киловатта в час. Этой батареей питается тяговый электродвигатель.



Рисунок 4 – Аккумуляторная батарея Evolute

Компьютер управления электромобилем, салон питаются обычным автомобильным аккумулятором. На автомобиле установлено три жидкостных системы охлаждения, каждая со своим расширительным бачком. Одна система охлаждения идёт на мотор, вторая идёт на батарею, и третья система охлаждения, на которой установлен подогрев, циркулирует через салон. Что касается самого мотора, то здесь он асинхронный, мощностью 120 киловатт. Тяговый двигатель расположен на передней оси. Электрокомпоненты в данном случае являются аналогами китайских, так как завод «Моторинвест» производит свои автомобили по лицензии китайского производителя DongFeng.

На электромобилях применяется охлаждение двигателя жидкостного типа. Как и на ДВС, у «электрички» есть свои бачок, радиатор, отопление салона. Каналы для циркуляции антифриза проходят в корпусе двигателя, что обеспечивает отвод тепла от электромотора. Аналогично, такие же каналы находятся и в батарее, и возле электрооборудования. Система охлаждения может быть выполнена как в виде раздельных кругов циркуляции, на примере Evolute-Dongfeng, так и единой большой системой, как на примере Tesla (рис. 5). У американского производителя так же может применяться дополнительное охлаждение антифриза в сильно жаркую погоду с помощью фриона в системе кондиционера.

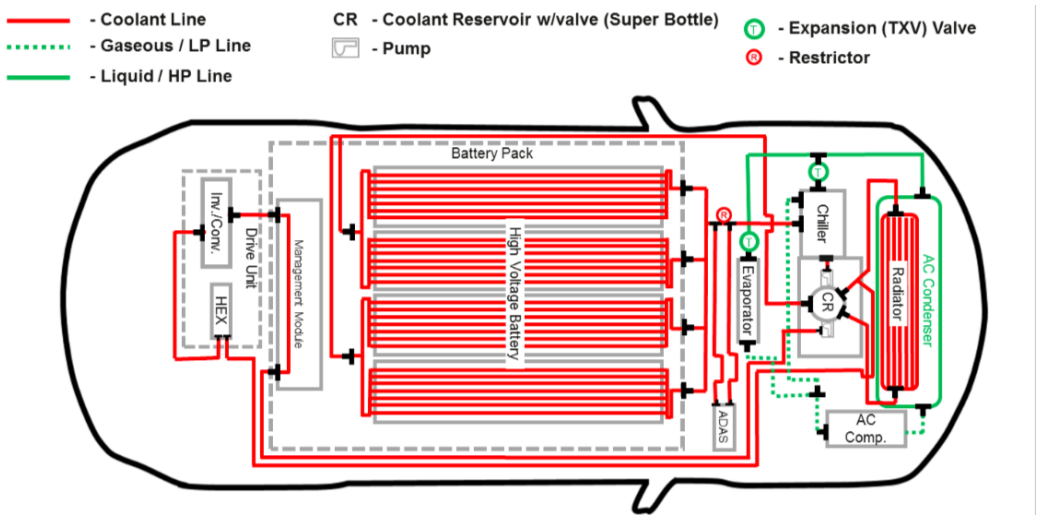


Рисунок 5 – Система охлаждения Tesla

Что касается охлаждающей жидкости для электромобилей, то здесь используется специальный антифриз, который не применяется на системах с обычным ДВС. Связано это с токопроводностью, которую для электротранспорта производители жидкости снижают специальным химическим составом.

Для систем охлаждения электромобилей антифриз в основном синего цвета и может маркироваться по-разному. Например, оригинальный антифриз Tesla идёт с маркировкой G48, как и от некоторых других брендов. В России часть компаний маркирует свои антифризы, как некоторые обычные – G12++.

Особенности конструкции электродвигателей грузовых автомобилей

Если говорить о тяговых электромоторах для коммерческого сегмента, то здесь в основном всё аналогично легковым электромобилям. Возьмём для примера модели, разработанные на базе Gazelle Next. На семейство электромобилей Next Electro ставится асинхронный двигатель производителя Siemens, модели 1PV5135-4WS14, который базируется на раме. На электромотор для улучшения тяговых характеристик дополнительно ставится понижающий редуктор с отношением 2,3 (Рис. 6). Под капотом так же устанавливаются силовой инвертор-преобразователь и бортовое зарядное устройство мощностью 22 кВт.

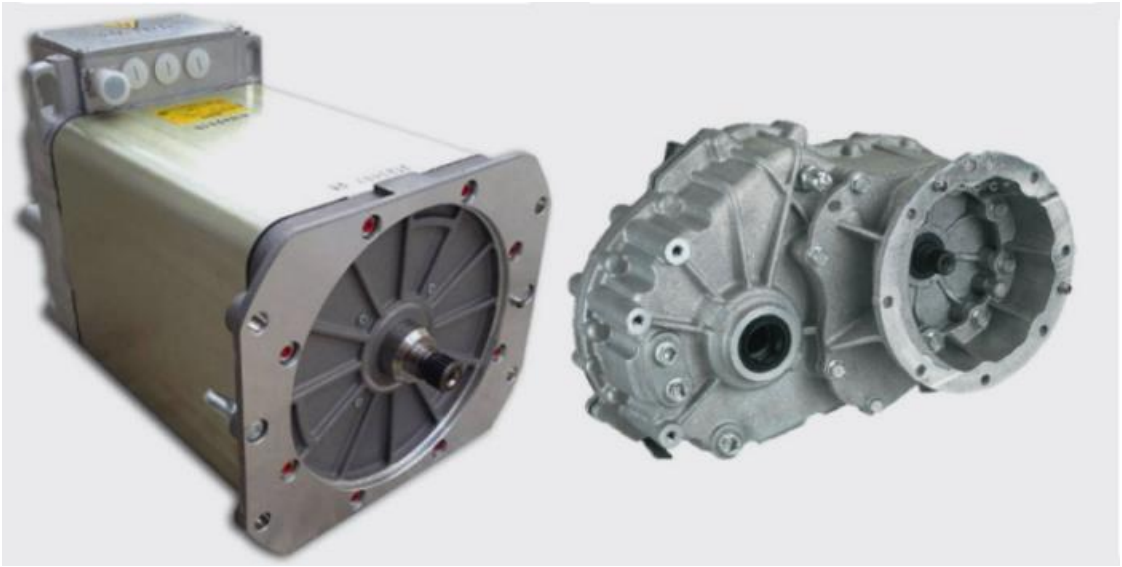


Рисунок 6 – Тяговый электромотор Siemens и редуктор автомобиля Gazelle e-NN

Тяговая батарея изготовлена с помощью литиевых необслуживаемых аккумуляторов. Аккумулятор размещен в герметичных контейнерах с подогревом под полом автомобиля. Номинальное напряжение аккумуляторной батареи – 346 В, емкость – 49 кВтч. Батарея оборудована системой контроля, которая обеспечивает контроль напряжений и температуры на каждой ячейке, силу тока, осуществляет балансировку. Все электрические компоненты автомобиля имеют жидкостное охлаждение.

Анализ режимов работы тяговых электродвигателей автомобилей

Что касается тягово-скоросной характеристики двигателя электромобиля, то каждый производитель пытается подстроить тяговый электродвигатель автомобиля под свои задачи.

К примеру, легковой электромобиль Leaf заточен под стандартную городскую езду, что видно по показателям двигателя. Так же автомобиль на электротяге имеет более высокие характеристики, чем на бензиновом, аналогичного класса (рис. 7). В таблице 1 представлены сравнительные характеристики различных электродвигателей для легковых автомобилей.

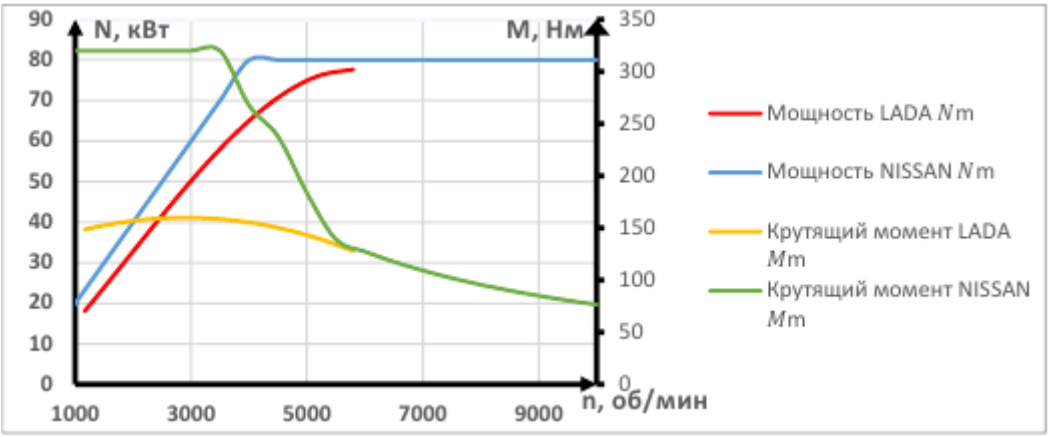


Рисунок 7 – Сравнение внешней скоростной характеристики двигателей легковых автомобилей

Если взять грузовой сегмент, то здесь электродвигатель больше заточен на мощность и тяговые параметры, так как на автомобиле необходимо возить грузы массой в 7 тонн и более.

Таблица 1 – Характеристики легковых электродвигателей

Модель ТЭД	Tesla	DongFeng	BYD	Nissan EM61	Bosch
Автомобиль	Tesla S	Evolute	BYD Han	Leaf ZE0	Smart
Мощность, кВт	514	120	163	80	55
Кр. момент, Нм	720	225	330	280	н/д
Запас хода, км	593	405	506	200	130
Ёмкость, кВтч	100	53	64,8	24	17,6
Максимал. частота, об/мин	16000	16000	15000	10390	12000

Внешняя скоростная характеристика (рис. 8) представлена на основе двигателя электрогрузовика Foton. В таблице 2 приведены сравнительные характеристики электродвигателей коммерческой техники.

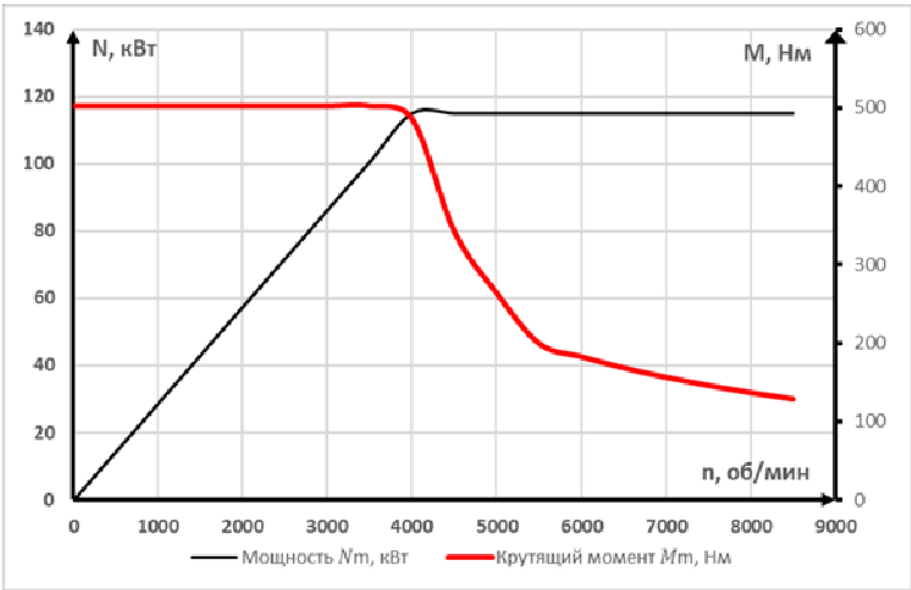


Рисунок 8 – Внешняя скоростная характеристика двигателя грузового электромобиля

Таблица 2 – Характеристики грузовых электродвигателей

Модель ТЭД	Siemens	ЭМ-Рус	Foton
Автомобиль	ГАЗ Next	EVM (УАЗ)	Foton, Brock 75
Мощность, кВт	98	80	115
Кр. момент, Нм	300	300	300
Запас хода, км	200	300	300
Ёмкость, кВтч	49	90	81
Максимальная частота, об/мин	9000	10000	12000
Грузоподъемность, кг	2500	1000	5000

Заключение

В заключение можно констатировать, что устройство электродвигателя в автомобиле представляет собой яркий пример технологической эволюции, где простота физического принципа сочетается с инженерной сложностью исполнения. В отличие от ДВС, электромотор обладает минимальным количеством подвижных частей, что напрямую влияет на его высочайшую надежность, КПД, превышающий 90%, и мгновенную доступность крутящего момента.

Однако электродвигатель — это лишь часть большой экосистемы. Его эффективная работа невозможна без мощной тяговой батареи, инвертора и си-

стемы управления, регулирующих все процессы. Именно синергия этих компонентов определяет ходовые характеристики электромобиля — его динамику, запас хода и долговечность.

Подводя итог, переход на электрическую тягу — это не просто смена источника энергии, а коренная трансформация архитектуры автомобиля. Изучение устройства электродвигателя позволяет осознать масштаб этих изменений и увидеть в электромобиле не просто транспорт, а высокотехнологичное устройство на колесах, за которым стоит будущее всей автомобильной отрасли.

Список литературы

1. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. Т. 1 и 2 / И. П. Копылов, Б. К. Клокова. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 1 т. – 456 с. ISBN 5-283-00500-3, 1989. – 2 т. – 688 с. ISBN 5-283-00531-3.

2. Электродвигатели и электрооборудование. Каталог. Ч. 1. - М.: ИКФ «Каталог», 1994.

3. Буянкин В. М. Цифровое управление электродвигателями / В. М. Буянкин. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. - 188 с.

4. Гуревич, Г. С. Внутренняя структура возникновения тока в электрогенераторе. Внутренняя структура возникновения сил в роторе электродвигателя. Теория абсолютности / Г. С. Гуревич, С. Н. Каневский. - М.: У Никитских ворот, 2017. - 116 с.

5. Авсиевич, А. В. Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте / А. В. Авсиевич // Материалы IV всероссийской научно-практической конференции. – Самара, 2022. – С. 50.

6. Нартов, П. А. Сравнительный анализ тягово-скоростных свойств автомобиля и электромобиля одного класса / П. А. Нартов, П. А. Колядин, В. И. Прядкин. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. DOI: 10.58168/IPMTTM2023_68-77 EDN: SHDBBR.

7. Лимарев, А. С. Обзор возможности применения электромобилей / А. С. Лимарев, И. Ю. Мезин, М. Ю. Воротников. – М. : Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, 2021. – Т. 12, № 1. – 87-90 с. EDN: FNDQQR.

8. Артемов, А. В. Тягово-динамический расчет грузового электромобиля Foton / А. В. Артемов, П. А. Колядин, В. И. Прядкин. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. DOI: 10.58168/IPMTTM2023_4-9 EDN: WZJNFM.

9. Мальцев, Н. Г. К вопросу оценки характеристик современных коммерческих автомобилей и электротягачей категории № 3 / Н. Г. Мальцев // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Международной научно-практической конференции ; отв. ред. Д. В. Капский. – Минск, 2019. – С. 93-99.

10. Уланов, А. Г. Теория наземных транспортных средств. Тяговый расчет электромобиля: учеб. пособие / А. Г. Уланов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2018. - 361 с.

References

1. Kopylov, I. P. Handbook of Electrical Machines: In 2 vols. Vols. 1 and 2 / I. P. Kopylov, B. K. Klokova. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. – Vol. 1. – 456 p. ISBN 5-283-00500-3; 1989. – Vol. 2 – 688 p. ISBN 5-283-00531-3.

2. Electric motors and electrical equipment. Catalog. Part 1. — Moscow: IKF “Catalog”, 1994.

3. Buyankin, V. M. Digital Control of Electric Motors / V. M. Buyankin. – Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. – 188 p.

4. Gurevich, G. S. The Internal Structure of Current Generation in an Electric Generator. The Internal Structure of Force Generation in an Electric Motor Rotor. The Theory of Absoluteness / G. S. Gurevich, S. N. Kanevsky. – Moscow: U Nikitskikh Vorot, 2017. – 116 p.

5. Avsievich, A. V. Mechatronics, Automation and Control in Transport / A. V. Avsievich // Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference. – Samara, 2022. – P. 50.

6. Nartov, P. A. Comparative analysis of traction and speed properties of a car and an electric vehicle of the same class / P. A. Nartov, P. A. Kolyadin, V. I. Pryadkin. – Voronezh: VGLTU, 2023. DOI: 10.58168/IPMTTM2023_68-77 EDN: SHDBBR.

7. Limarev, A. S. Review of the possibility of using electric vehicles / A. S. Limarev, I. Yu. Mezin, M. Y. Vorotnikov– Moscow : Actual Problems of modern Science, Technology and Education, 2021. Vol. 12, No. 1. 87-90 p. EDN: FNDQQR.

8. Artyomov, A.V. Traction and dynamic calculation of the Foton electric truck / A.V. Artyomov, P. A. Kolyadin, V. I. Pryadkin – Voronezh: VGLTU, 2023. DOI: 10.58168/IPMTTM2023_4-9 EDN: WZJNFM.

9. Maltsev, N. G. On the issue of assessing the characteristics of modern commercial vehicles and electric tractors of category No. 3 / N. G. Maltsev // Automotive and tractor engineering. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference ; Edited by D. V. Kapsky. – 2019. – Pp. 93-99.

10. Ulanov, A. G. Theory of Ground Vehicles. Traction Calculation of an Electric Vehicle: textbook. manual / A. G. Ulanov. – Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University, 2018. – 361 p.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_53-61
УДК 629.114.2.011.5:62

Мазуров А.В.
студент автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Бодаченко П.К.
студент автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Затонский А.П.
кандидат техн. наук, конструктор ООО «Агро-Гарант», г. Воронеж, РФ

Мерчалов С.В.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Mazurov A.V.
student of the automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Bodachenko P.K.
student of the automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Zatonsky A.P.
Candidate of Technical Sciences, Designer of Agro-Garant LLC, Voronezh, Russian Federation
Merchalov S.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО ФИЛЬТРА ДВС ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СТУПЕНИ ОЧИСТКИ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE AIR FILTER FOR TRACTOR DIESELS BY USING AN ADDITIONAL ELECTROSTATIC PURIFICATION STAGE

Аннотация. В рамках проведенных исследований ставилась задача сопоставить работу сухого штатного воздухоочистителя (ВО), оснащенного БФЭ и моноциклоном в качестве предварительной ступени, с его аналогом, где вместо моноциклона использовался электроциклон, при этом условия эксперимента максимально имитировали реальную эксплуатацию. В процессе исследований производилась оценка показателей фильтрации стандартного ВО: сначала с комплектацией серийным моноциклоном, а затем с установкой разработанного электроциклона. Проведенная апробация предложенной системы очистки воздуха была осуществлена на двигателе Д-240Л. Результаты испытаний электростатической ступени воздухоочистителя (ВО) продемонстрировали повышение эффективности очистки, которое составляет 8-22 % по сравнению с моноциклонной ступенью.

Abstract. As part of the research, the task was to compare the operation of a dry standard air purifier (VO) equipped with a BFE and a monocyclone as a preliminary stage with its counterpart,

© Мазуров А. В., Бодаченко П. К., Затонский А. П, Мерчалов С. В., Прядкин В. И., 2026

where an electric cyclone was used instead of a monocyclone, while the experimental conditions maximally imitated real operation. In the course of the research, the filtration parameters of the standard HE were evaluated: first with a complete set of a serial monocyclone, and then with the installation of a developed electric cyclone. The approbation of the proposed air purification system was carried out on the D-240L engine. The test results of the electrostatic air purifier stage demonstrated an increase in cleaning efficiency, which is 8-22% compared to the monocyclone stage.

Ключевые слова: воздушный фильтр, эффективность очистки, моноциклон, электростатическая ступень очистки, электроциклон, ионизированная пыль, электрическое поле, воздушный поток, бумажные фильтрующие элементы (БЭФ).

Keywords: air filter, cleaning efficiency, monocyclone, electrostatic stage of cleaning, electrocyclone, ionized dust, electric field, air flow, major filter elements (BEF).

Введение

Атмосферная среда, в которой функционируют силовые агрегаты современных сельскохозяйственных тракторов (рис. 1 и рис. 2), характеризуется высокой концентрацией минеральной пыли. В зоне с/х работ концентрация ее может составлять от 5 до 20 мг/м^3 [1]. В состав пыли входят такие включения как окиси кальция, железа, кремния и др. Основная составная частью пыли, которая сопутствуют ускоренному износу цилиндропоршневой группы двигателя являются пылинки окиси кремния (кварца) [2]. Причиной является, их повышенная поверхностная твердость, которая в два раза превышает твердость высококачественных сталей. Это приводит к снижению мощности двигателя и повышенному расходу топлива [3, 4].



Рисунок 1 – Трактор при внесении удобрений в почву



Рисунок 2 – Трактор при посеве с/х культур

При эксплуатации сельскохозяйственной техники, функционирующей в воздушной среде с высокой концентрацией минеральной пыли, необходимо учитывать влияние данного фактора на эксплуатационные характеристики воздушных фильтров, что может привести к снижению их эксплуатационных ха-

рактеристик. Вызвать преждевременную утрату их способности эффективно выполнять свои функции в пределах установленного срока службы, что может привести к снижению их эксплуатационных характеристик. Вызвать преждевременную утрату их способности эффективно выполнять свои функции в пределах установленного срока службы.

Это дает основание для проведения дополнительных исследований, направленных на разработку инновационных методов фильтрации, которые могли бы быть интегрированы в системы воздухоочистки современных тракторных двигателей [5].

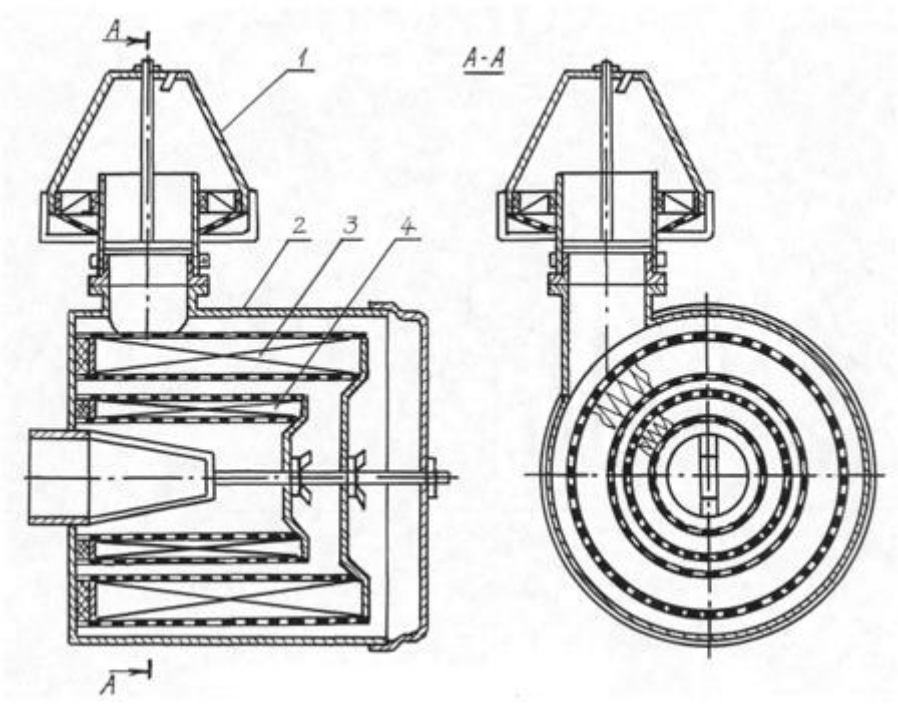
Цель работы

Целью испытаний было сравнительное изучение эффективности воздухоочистителя (ВО) сухого типа с БФЭ и предочистителем в виде моноциклона и с электростатической ступенью очистки в виде электроциклона в условиях, максимально приближенных к реальным. В ходе экспериментов оценивалась эффективность очистки воздуха серийным ВО с предочистителем моноциклоном и с заменой его предлагаемым электроциклоном. Для детального анализа и оценки эксплуатационных характеристик были проведены лабораторно-полевые испытания серийного воздухоочистителя предочистителем в виде моноциклона и с электростатической ступенью очистки в виде электроциклона.

В рамках проведенных тестов ставилась задача сопоставить работу сухого воздухоочистителя (ВО), оснащенного БФЭ и моноциклоном в качестве предварительной ступени, с его аналогом, где вместо моноциклона использовался электроциклон, при этом условия эксперимента максимально имитировали реальную эксплуатацию. В процессе исследований производилась оценка показателей эффективности очистки стандартного ВО: сначала с комплектацией серийным моноциклоном, а затем с установкой разработанного электроциклона.

Объект исследования

Сравнительное тестирование ВО с моноциклоном и электроциклоном выполнено на штатном воздухоочистителе сухого типа с БФЭ, применяемого на двигателях семейства СМД-14 и Д-240. На рисунке 3 представлена конструктивно-техногическая схема ВО, на рисунке 4 основные элементы ВО-фильтрующие элементы и на рисунке 5 моноциклон, которые непосредственно работают с воздушной средой для ее очистки от пылевых включений.



1 – моноциклон; *2* – корпус воздухоочистителя; *3* – элемент, фильтрующий основной; *4* – предохранительный фильтрующий элемент

Рисунок 3 – Конструктивно-техногическая схема штатного ВО с моноциклоном



Рисунок 4 – Бумажный фильтрующий элемент (БЭФ) основной, бумажный фильтрующий элемент (БЭФ) предохранительный

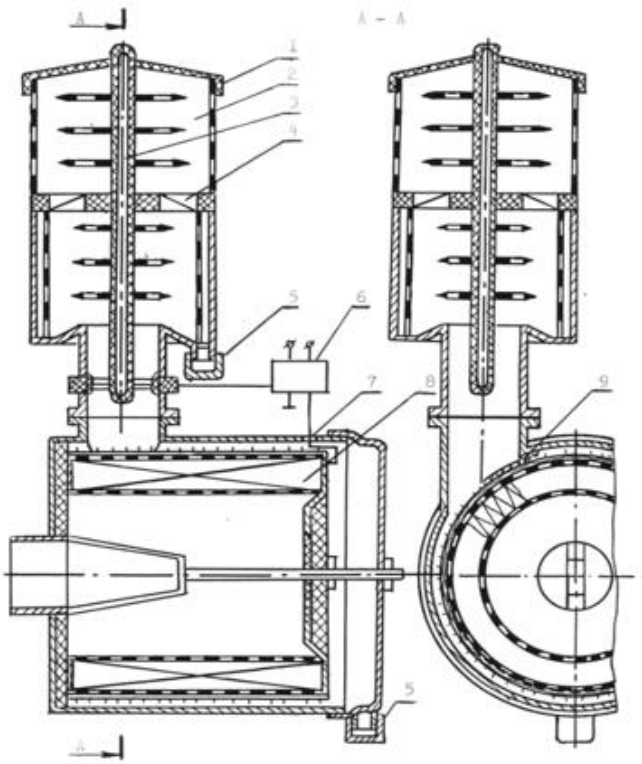


Рисунок 5 – Моноциклон

На рис. 6 представлена конструктивно-техногическая схема ВО с электроциклоном [6]. На рис. 7 модернизированный ВО с разработанным электроциклоном для тестирования его эксплутационных характеристик.

Согласно конструктивно-техногической схемы ВО рис.6. электроциклон 1состоит из двух камер, разделенных между собой завихрителем 4 из диэлектрического материала. Первая камера ионизатора 2 расположена в верхней

части электроциклона на входе воздушно- пылевого потока в ВО. Вторая камера является осадительной и расположена за завихрителями 4 из диэлектрического материала, где установлен перфорированный вертикальный осадительный электрод и соединенную с системой пылеулавливания 5. Работа электростатической ступени совместно со штатным ВО происходит следующим образом.



1 – электроциклон; *2* – камера ионизатор с дисковыми перфорируемыми электродами; *3* – коронирующий электрод; *4, 9* – завихрители из диэлектрического материала; *5* – устройство для удаления пыли; *6* – высоковольтный источник электропитания (ВИЭП); *7* – корпус с крышкой-осадитель; *8* – фильтрующий элемент с предфильтром из токопроводящего материала

Рисунок 6 – Конструктивно-техногическая схема ВО с электроциклоном

При работе дизеля воздушно- пылевой поток проходит через перфорированные диски электроциклона 1. Перфорированные диски образуют камеру ионизатора 2. На перфорированных дисках камеры ионизатора 2 происходит удаление крупных пылевых частиц из воздушно- пылевого потока путем ситового фракционирования и электростатического воздействия. В камеры ионизатора 2 частицы пыли приобретают электрический заряд, а воздух ионизируется. Ионизированный пылевоздушный поток при прохождении через устройство 4 (завихрителе) закручивается и поступает в осадительную камеру. Так как на за-

ряженные пылевые частицы действуют силы электрического поля и центробежные они двигаются к вертикальному перфорированному осадительному электроду. На перфорированном осадительном электроде происходит выделение из воздушного потоко мелких и крупных пылинок. Пылинки, у которых размеры меньше размеров отверстий перфорации осадительного электрода поступают в зазор между электродом и корпусом и выводятся в систему пылеулавливания 5.

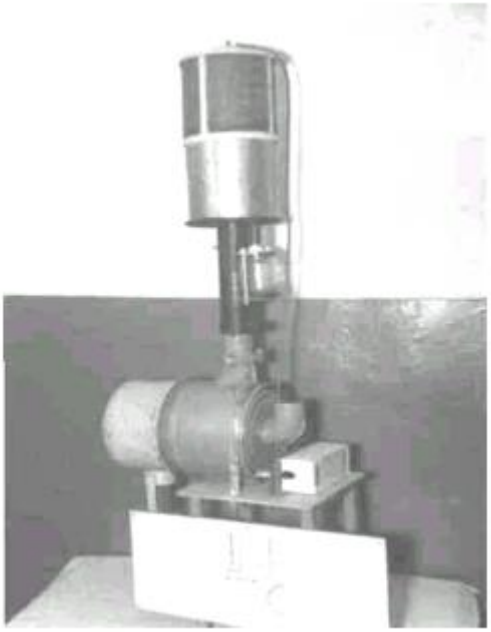


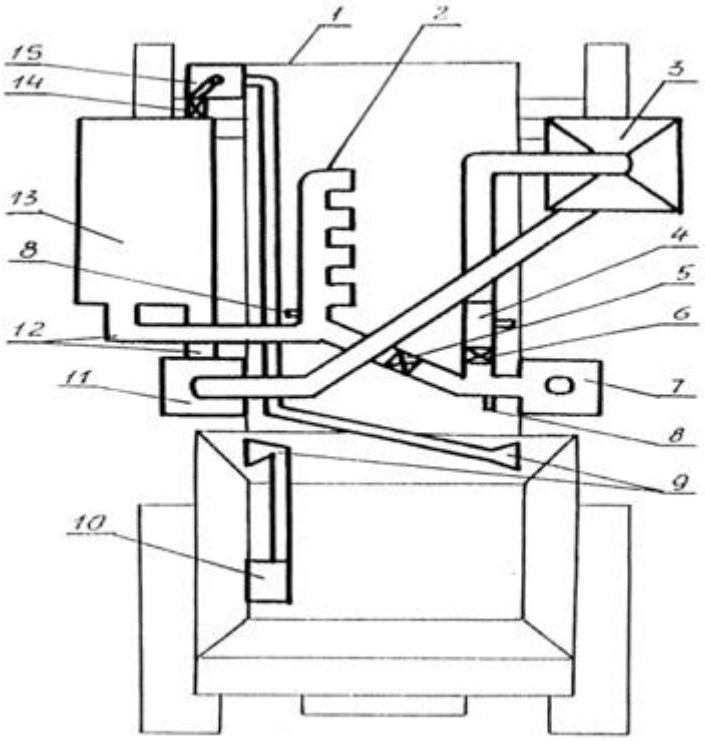
Рисунок 7 – Модернизированный ВО с разработанным электроциклоном для тестирования

Пылинки, у которых размеры больше размеров отверстий перфорации осадительного электрода поступают в осадитель, представляющий собой корпус 7 с изолированным фильтрующим элементом и предварительным фильтром. На фильтрующий элемент в корпусе 7 подается электрический потенциал того же знака, что и на коронирующий электрод 3, что заставляет пылевые частицы вращаться вокруг фильтрующего элемента за счет воздействия на них электрического поля и двигаться в устройстве для удаления пыли.

Установка для испытания ВО дизелей с электростатической ступенью и штатным фильтрующим элементом представлена на рисунке 8.

Работа установки происходит последовательно через контрольно-измерительные приборы и вспомогательное оборудование для измерения тестовых показателей. Воздушно-пылевая смесь из атмосферы подается в очиститель воздуха 7, где происходит удаление крупных частиц. Затем он при открытом кране 6 направляется в абсолютный фильтр 3, с помощью которого можно определить массовый коэффициента очистки, чтобы оценить эффективность работы электростатической ступени. Для измерения расхода воздуха он посту-

пает в газомер 11 и дальше направляется в ресивер 13 для минимизации пульсаций, вызванных работой поршней, а потом направляется во впускной коллектор 2 двигателя.



1 – трактор МТЗ-80Л; *2* – впускной коллектор двигателя Д-240; *3* – абсолютный фильтр; *4* – устройство для частичного отбора проб воздуха; *5, 6, 14* – краны; *7* – воздухоочиститель; *8* – штуцеры для измерения гидравлического сопротивления; *9* – аллонжи; *10* – прибор ОТВ; *11* – счетчик РГ-400; *12* – трубопроводы; *13* – ресивер; *15* – счетчик РГ-400

Рисунок 8 – Установка для испытания ВО дизелей на базе двигателя Д-240

Работа установки происходит последовательно через контрольно-измерительные приборы и вспомогательное оборудование для измерения тестовых показателей. Воздушно-пылевая смесь из атмосферы подается в очиститель воздуха 7, где происходит удаление крупных частиц. Затем он при открытом кране 6 направляется в абсолютный фильтр 3, с помощью которого можно определить массовый коэффициента очистки, чтобы оценить эффективность работы электростатической ступени. Для измерения расхода воздуха он поступает в газомер 11 и дальше направляется в ресивер 13 для минимизации пульсаций, вызванных работой поршней, а потом направляется во впускной коллектор 2 двигателя.

Результаты и обсуждения

Анализ результатов испытаний электростатической ступени ВО (рис. 9)

показывают, что предлагаемая технология очистки воздуха с применением электростачиской ступени в виде электроциклона по сравнению с моноциклоном повышает извлечении пыльных фракций из воздушного потока от 8% до 22%. Электроциклон, задерживая часть этой пыли, может продлевать срок службы БФЭ воздухоочистителя.

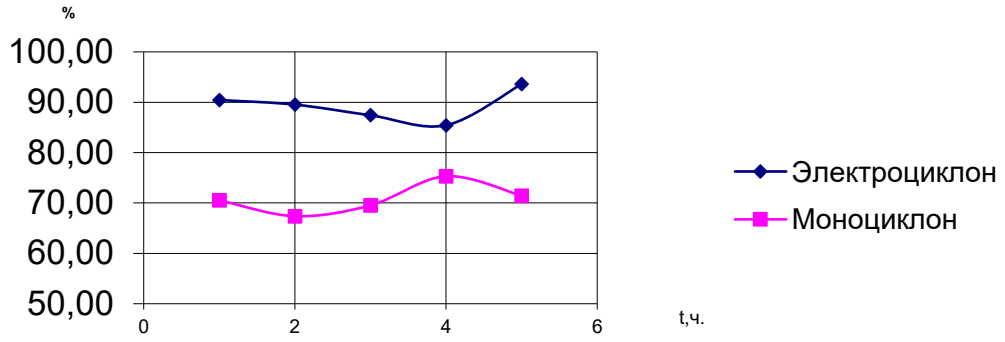


Рисунок 9 – Эффективность очистки воздуха электроциклоном и моноциклоном

Увеличение эксплуатационного ресурса БФЭ, в свою очередь, приводит к экономии средств и времени, за счет сокращения затрат на закупку, замену и техническое обслуживание трактора.

Выводы

1. Атмосферная среда, в которой функционируют силовые агрегаты современных сельскохозяйственных тракторов, характеризуется высокой концентрацией минеральной пыли. В зоне с/х работ концентрация ее может составлять от 5 до 20 мг/м^3, что приводит к снижению их эксплуатационных характеристик.

2. Результаты испытаний показали, что серийный ВО с предлагаемым предочистителем электроциклоном повышает извлечении пыльных фракций из воздушного потока от 8% до 22% по сравнению с моноциклоном и снижает пылевую нагрузку на БФЭ.

3. Применение электростачиской ступени в виде электроциклона ВО, может увеличить эксплуатационный ресурс фильтрующих элементов, а также привести к экономии средств и времени, за счет сокращения затрат на закупку, замену и техническое обслуживание трактора.

Список литературы

1. Кодиров, Т. Х. Обеспечение чистоты воздуха, поступающего в двигатель Д-240 при эксплуатации тракторов МТЗ-80Х: дис. канд. техн. наук / Т. Х. Кодиров. – М., 1989. – 187 с.

2. Слабов, Е. П. Влияние очистки воздуха на ресурс двигателя / Е. П. Слабов, В. С. Антропов, В. Б. Нилов // Автомобильный транспорт. – 1978. - № 4. – 41–42 с.

3. Лапшин, С. А. Улучшение эксплуатационных свойств трактора ЛТЗ-60АВ за счет применения мультициклонного воздухоочистителя / С. А. Лапшин, В. А. Байбарин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2010. – № 2 (25). – 32–36 с.

4. Современные автомобильные воздушные фильтры и требования, предъявляемые к ним / А. С. Ащеулов, А. С. Ащеулова, А. В. Кудреватых, Н. О. Фрянов, Б. И. Сатторов // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте (ИИТМА-2020) : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции с онлайн-участием. – Кемерово, 2020. – 568 с.

5. Мерчалов, С. В. Совершенствование системы очистки воздуха ДВС автомобилей семейства КАМАЗ / С. В. Мерчалов, А. П. Затонский, В. Ю. Татаринцев // Повышение эксплуатационных качеств мобильных транспортно-технологических средств : материалы Всероссийской научной конференции. – Воронеж, 2023. – 32–36 с.

6. Патент 2096650 РФ, МКИ^{6} F 02 M 35 / 22. Воздухоочиститель для двигателя внутреннего сгорания / А. П. Затонский; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки. – 95106826/06; заявл. 25.09.95; опубл. 20.11.97, Бюл. № 32. - 12 с. : ил.

References

1. Kodirov, T. Kh. Ensuring the purity of the air supplied to the D-240 engine during the operation of MTZ-80X tractors: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / T. Kh. Kodirov. – Moscow, 1989. – 187 p.

2. Slabov, E. P. The Effect of Air Purification on Engine Service Life / E. P. Slabov, V. S. Antropov, V.B. Nilov // Automotive Transport. – 1978. – No. 4. – pp. 41–42.

3. Lapshin, S. A. Improving the Operational Properties of the LTZ-60AV Tractor through the Use of a Multicyclone Air Cleaner / S. A. Lapshin, V. A. Baibarin // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2010. No. 2 (25) – pp. 32–36.

4. Modern automotive air filters and the requirements imposed on them / A.S. Ashcheulov, A. S. Ashcheulova, A. V. Kudrevatykh, N. O. Fryanov, B. I. Sattorov // Innovations in Information Technologies, Mechanical Engineering, and Motor Transport (IITMA-2020) : collection of materials from the IV International Scientific and Practical Conference with online participation. – Kemerovo, 2020. – 568 p.

5. Merchalov, S. V. Improving the air purification system of the internal combustion engine of KAMAZ family vehicles / S. V. Merchalov, A. P. Zatonsky, V. Yu. Tatarintsev // Improving the operational performance of mobile transport and technological equipment : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. – Voronezh, 2023. – pp. 32–36.

6. Patent 2096650 RF, MKI6 F 02 M 35 / 22. Air cleaner for an internal combustion engine / A. P. Zatonsky; applicant and patent holder. Voronezh State Agrarian University named after K.D. Glinka. – 95106826/06; filed on 25.09.95; published on 20.11.97, Bull. No. 32. – 12 p.: ill.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_62-67
УДК 629.015

Онищенко Д.Д.
студентка энергомашиностроительного факультета Московского государственного технического университета им. Баумана, РФ
Школьных А.В.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Артёмов А.В.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Onishchenko D.D.
A student at the Power Engineering Faculty of Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation
Shkolnykh A.V.
assistant at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Artemov A.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ЭВОЛЮЦИЯ НОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ (СТАНДАРТЫ «ЕВРО») И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ АВТОТРАНСПОРТА

THE EVOLUTION OF ENVIRONMENTAL STANDARDS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY (EURO STANDARDS) AND WAYS TO IMPROVE APPROACHES TO ASSESSING THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF VEHICLES

Аннотация. В статье рассматривается, как менялись экологические стандарты для автомобилей серии «Евро» с первого по шестой. Разбираются причины, по которым эти нормы вообще появились, приводится хронология их введения и показано, насколько сильнее с каждым разом становились требования к выбросам. Отдельное внимание уделено сравнению предельно допустимых концентраций основных загрязняющих веществ. Кроме того, в работе поднимается проблема того, что привычная классификация «Евро» плохо подходит для электромобилей, и это требует пересмотра самих подходов к нормированию. В конце предлагаются возможные направления улучшения существующей системы экологической стандартизации.

Abstract. The article examines how environmental standards for Euro-series vehicles changed from the first to the sixth generation. The reasons for the introduction of these norms are analysed, the chronology of their adoption is given, and the dynamics of tightening emission requirements is shown. Special attention is paid to comparing the maximum permissible concentrations of the main pollutants. The paper also raises the problem that the usual Euro classification is poorly applicable to electric vehicles, which requires a revision of the

© Онищенко Д. Д., Школьных А. В., Артёмов А. В., Прядкин В. И., 2026

standardisation approaches themselves. In conclusion, possible directions for improving the existing environmental standardisation system are proposed.

Ключевые слова: экологический стандарт Евро, нормирование выбросов, автомобильный транспорт, двигатель внутреннего сгорания, токсичность отработавших газов, оксиды азота, твердые частицы, электромобиль, нулевые выбросы (ZEV), жизненный цикл транспортного средства, экологическая безопасность, утилизация батарей.

Keywords: Euro 5 emission standard, emission standards, motor vehicles, internal combustion engine, exhaust gas toxicity, nitrogen oxides, particulate matter, electric vehicle, zero emission vehicle (ZEV), vehi-cle life cycle, environmental safety, battery recycling.

Введение

Автомобили уже много лет остаются одним из главных источников загрязнения воздуха в крупных городах. Выхлопные газы, в которых содержатся оксид углерода (CO), оксиды азота (NOx), несгоревшие углеводороды (HC) и твёрдые частицы (PM), вредят здоровью людей и окружающей среде. Когда это стало очевидно на уровне разных стран, появилась необходимость договориться об общих правилах и закрепить их в законодательстве [1].

Цель работы — посмотреть, как формировалась и развивалась система технических регламентов «Евро», а также найти противоречия, которые возникают, когда эти нормы пытаются применять к электромобилям. Объект исследования — экологические стандарты серии «Евро», предмет — их количественные показатели и то, на какие машины они распространяются.

Причины и предпосылки введения стандартов «Евро»

Сначала нормы по выбросам автомобилей действовали только внутри отдельных стран. Но к концу 1980-х стало понятно, что загрязняющие вещества переносятся через границы, и решать проблему нужно сообща, в рамках Европейского экономического сообщества [2]. Исследования того времени показали, что чем больше становится автомобилей, тем чаще люди болеют респираторными заболеваниями. Также транспорт вносил заметный вклад в кислотные дожди и фотохимический смог [1, 3].

Отдельно стоит сказать про этилированный бензин. Тетраэтилсвинец добавляли в топливо, чтобы повысить октановое число, но при сгорании в воздух попадал свинец, который очень токсичен и поражает нервную систему [4]. Из-за этого пришлось не только запретить вредные присадки, но и разрабатывать новые системы очистки выхлопа, например каталитические нейтрализаторы. На этилированном бензине они нормально работать не могли [3, 5].

Получается, что стандарт Евро-1 (директива 91/441/EEC), введённый в 1992 году, был не просто техническим требованием. Это было комплексное

решение: запретить устаревшие технологии и заставить производителей делать более совершенные системы очистки выхлопных газов [2, 5].

Хронология принятия и динамика ужесточения норм

Развитие стандартов «Евро» — хороший пример того, как государство постепенно давит на отрасль, чтобы ускорить технический прогресс. Ниже приведена хронология основных этапов для легковых автомобилей категории M1, составленная на основе директив Европейской экономической комиссии ООН [2, 5, 6, 7]:

Евро-1 (июль 1992 г.) — первый общеевропейский стандарт, который фактически обязал устанавливать нейтрализаторы.

Евро-2 (январь 1996 г.) — нормы по CO и HC стали жёстче, а для бензиновых и дизельных двигателей ввели разные требования [6].

Евро-3 (январь 2000 г.) — появилось отдельное ограничение по NOx, а также сократилось время прогрева двигателя в тестовом цикле [5].

Евро-4 (январь 2005 г.) — выбросы твёрдых частиц у дизелей снизились почти на 70% по сравнению с Евро-3 [7].

Евро-5 (сентябрь 2009 г.) — нормы по твёрдым частицам (PM) для дизелей стали намного строже (до 0,005 г/км), из-за чего сажевые фильтры (DPF) стали практически обязательными [6, 7].

Евро-6 (сентябрь 2014 г.) — ещё сильнее сократились выбросы оксидов азота (NOx), особенно у дизельных двигателей [5, 7].

Количественный анализ предельных норм выбросов

Чтобы понять, насколько жёсткими стали требования, удобно посмотреть, как менялись предельные значения по основным загрязняющим веществам для легковых автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями. Из таблицы видно, что сильнее всего ужесточились нормы по твёрдым частицам и NOx для дизелей [6, 7].

Таблица 1. Предельные нормы выбросов для легковых автомобилей (категория M1) в рамках стандартов Евро-3 — Евро-6, г/км

Стандарт	Тип двигателя	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM
Евро-3 (2000)	Бензин	2.30	0.20	0.15	—	—
	Дизель	0.64	—	0.50	0.56	0.05
Евро-4 (2005)	Бензин	1.00	0.10	0.08	—	—
	Дизель	0.50	—	0.25	0.30	0.025

Евро-5 (2009)	Бензин	1.00	0.10	0.06	—	0.005*
	Дизель	0.50	—	0.18	0.23	0.005
Евро-6 (2014)	Бензин	1.00	0.10	0.06	—	0.005*
	Дизель	0.50	—	0.08	0.17	0.005

* Примечание: для бензиновых двигателей с прямым впрыском.

Если посмотреть на таблицу, становится ясно, что Евро-4 и Евро-5 стали переломными для дизельных двигателей. Чтобы уложиться в новые нормы, производителям пришлось внедрять рециркуляцию выхлопных газов (EGR), сажевые фильтры, а затем и систему избирательной каталитической нейтрализации (AdBlue), чтобы выполнить требования Евро-6 по NOx [5, 6, 7].

Проблема применимости стандарта Евро-5 к электромобилям

Когда на рынке появилось много электромобилей, обнаружилось концептуальное противоречие в системе сертификации. Стандарты «Евро» изначально создавались для машин с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и регулируют состав отработавших газов [2, 8].

Электромобили с чисто электрическим двигателем во время работы вообще не выбрасывают ничего. Они относятся к категории ZEV (Zero Emission Vehicle) — транспортных средств с нулевым выхлопом [8, 9]. Поэтому возникает вопрос: можно ли вообще применять к ним понятие «экологический класс Евро-5»?

Формально электромобиль проходит любые нормы по выбросам из выхлопной трубы, потому что трубы у него просто нет. Значит, требовать от него соответствия Евро-5 или Евро-6 бессмысленно и методологически неверно. Обычная классификация «Евро» к машине с нулевыми эксплуатационными выбросами просто не подходит [8].

Пути совершенствования системы экологического нормирования

Система, которая оценивает только выбросы из выхлопной трубы (Tailpipe Emissions), уже устарела. Чтобы и дальше снижать вред от транспорта, нужно менять методологические подходы [9, 10].

По итогам анализа можно предложить несколько направлений:

1. Перейти к оценке полного жизненного цикла (Well-to-Wheel). Нужно учитывать выбросы не только при эксплуатации, но и при производстве энергии для зарядки электромобилей. Например, электростанции на угле оставляют большой углеродный след. Такой подход позволяет честно сравнивать ДВС и

электромобили с учётом того, как устроена энергетика конкретного региона [9, 11].

2. Ввести отдельную классификацию для транспорта с нулевыми эксплуатационными выбросами. Логично выделить электромобили в отдельный класс (например, «ZEV» или «Евро-0 местных выбросов») и не заставлять их проходить устаревшие процедуры сертификации по нормам выхлопа [8, 10].

3. Расширить список нормируемых факторов. Кроме химического загрязнения воздуха, стоит учитывать и другие экологические аспекты: шумовое загрязнение (на высоких скоростях электромобили шумят из-за шин) и требования к утилизации тяговых батарей [11, 12].

Заключение

Эволюция стандартов «Евро» — от первых норм 1992 года до Евро-6 — стала мощным драйвером технологического развития автопрома. Производителям пришлось разработать и внедрить сложные системы очистки выхлопа [1–3, 5]. Но с появлением электромобилей перед регуляторами встала новая задача: отказаться от устаревшей парадигмы «измерения в выхлопной трубе» и перейти к более сложной, многокомпонентной оценке экологичности транспорта, которая учитывает весь жизненный цикл энергии и материалов [9–11]. Разработка такой системы — главный путь дальнейшего совершенствования экологических требований.

Список литературы

1. Lenz, H.P., Cozzarini, C. Emissions and Air Quality. – Society of Automotive Engineers (SAE), 1999. – 146 p.

2. Directive 91/441/EEC of the Council of 26 June 1991 amending Directive 70/220/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles. – Official Journal of the European Communities, 1991.

3. Faiz, A., Weaver, C.S., Walsh, M.P. Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions. – The World Bank, Washington, D.C., 1996. – 264 p.

4. Needleman, H.L. The Removal of Lead from Gasoline: Historical and Personal Reflections // Environmental Research. – 2000. – Vol. 84, No. 1. – P. 20-35.

5. Berg, W. Legislation for the Reduction of Exhaust Gas Emissions. // In: Handbook of Diesel Engines. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 457-476.

6. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6). – Official Journal of the European Union, 2007.

7. Dieselnet. EU: Light-Duty: Emissions Standards – URL: https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php (дата обращения: 18.03.2026).

8. Фасхиев, Х. А. Переход на альтернативные виды топлива и автопилот как стратегические направления развития автотранспорта / Х. А. Фасхиев // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 12. – С. 20-27.

9. Hawkins, T.R., Gausen, O.M., Strømman, A.H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2012. – Vol. 17, No. 8. – P. 997-1014.

10. Ложкин, В. Н. Современные экологические требования к автотранспорту в условиях производства и эксплуатации / В. Н. Ложкин, Н. С. Буренин, В. В. Медейко // Транспорт Российской Федерации. – 2005. – № 1(1). – С. 64-65.

11. Messagie, M. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. – Transport & Environment, Brussels, 2017. – 34 p.

12. Zeng, X., Li, J., Liu, L. Solving spent lithium-ion battery problems in China: Opportunities and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 52. – P. 1759-1767.

References

1. Lenz, H.P., Cozzarini, C. Emissions and Air Quality. – Society of Automotive Engineers (SAE), 1999. – 146 p.

2. Directive 91/441/EEC of the Council of 26 June 1991 amending Directive 70/220/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles. – Official Journal of the European Communities, 1991.

3. Faiz, A., Weaver, C.S., Walsh, M.P. Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions. – The World Bank, Washington, D.C., 1996. – 264 p.

4. Needleman, H.L. The Removal of Lead from Gasoline: Historical and Personal Reflections // Environmental Research. – 2000. – Vol. 84, No. 1. – P. 20-35.

5. Berg, W. Legislation for the Reduction of Exhaust Gas Emissions. // In: Handbook of Diesel Engines. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 457-476.

6. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6). – Official Journal of the European Union, 2007.

7. Dieselnet. EU: Light-Duty: Emissions Standards. – URL: https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php (access date: 03/18/2026).

8. Faskhiev, H. A. Transition to alternative fuels and autopilot as strategic directions for the development of motor transport / H. A. Faskhiev // Automotive industry. - 2021. - No. 12. - P. 20-27.

9. Hawkins, T.R., Gausen, O.M., Strømman, A.H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles - a review // The International Journal of Life Cycle Assessment. - 2012. - Vol. 17, No. 8. - P. 997-1014.

10. Lozhkin, V. N. Modern environmental requirements for motor transport under production and operating conditions / V. N. Lozhkin, N. S. Burenin, V. V. Medeiko // Transport of the Russian Federation. – 2005. – No. 1(1). – P. 64-65.

11. Messagie, M. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. – Transport & Environment, Brussels, 2017. – 34 p.

12. Zeng, X., Li, J., Liu, L. Solving spent lithium-ion battery problems in China: Opportunities and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 52. – P. 1759-1767.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_68-75
УДК 620.9:621.464

Поздеев И.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Сотников Д.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Колядин П.А.
старший преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Pozdeev I.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Sotnikov D.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Kolyadin P.A.
senior lecturer of the department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ЗАПРАВОЧНЫЕ СТАНЦИИ ВОДОРОДА

CAR HYDROGEN FILLING STATIONS

Аннотация. В статье представлен обзор текущего состояния и пространственного распределения сети водородных заправочных станций в ведущих регионах мира – Азии, Европе и Северной Америке. На основе данных IEA и специализированных источников анализируются региональные модели развития.

Abstract. The article provides an overview of the current state and spatial distribution of the network of hydrogen filling stations in the leading regions of the world – Asia, Europe and North America. Regional development models are analyzed based on IEA data and specialized sources.

Ключевые слова: водородные заправочные станции, водородная энергетика, инфраструктура, плотность станций, Россия, Китай, Европа.

Keywords: hydrogen refueling stations, hydrogen energy, infrastructure, station density, Russia, China, Europe.

Введение

Водород рассматривается как один из ключевых энергоносителей для декарбонизации транспорта, особенно тяжелого грузового, общественного и специализированного. Развитие сети заправочных станций является критическим элементом водородной экономики, поскольку без доступной инфраструктуры невозможно массовое внедрение топливных элементов.

© Поздеев И. А., Сотников Д. А., Колядин П. А., Прядкин В. И., 2026

Глобальная сеть водородных заправочных станций превысила 1000 объектов, однако её распределение крайне неравномерно [8,9]. Азия доминирует по абсолютным показателям, Европа формирует коридорную модель, Северная Америка остаётся локализованной, а Россия только начинает развитие [8,10].

Целью данной статьи является сравнительный анализ плотности и моделей развития инфраструктуры водородных заправочных станций в разных регионах мира и оценить перспективы России на фоне международного опыта.

Анализ основан на обзоре открытых данных, отчётах, национальных стратегиях и научной литературы. Использованы количественные показатели (число станций, концентрации по регионам) и качественные характеристики (модели развития, государственная политика).

Глобальная сеть водородных заправочных станций в настоящее время находится на ранней стадии активного формирования (рис. 1). Несмотря на то, что общее количество станций уже превысило отметку в тысячу объектов, их географическое распределение характеризуется крайне высокой пространственной неравномерностью. Развитие инфраструктуры сильно зависит не только от уровня экономического развития отдельных стран, но и от выбранных национальных стратегий, объёмов государственной поддержки, приоритетов промышленной политики и наличия спроса со стороны конечных потребителей [8,9].

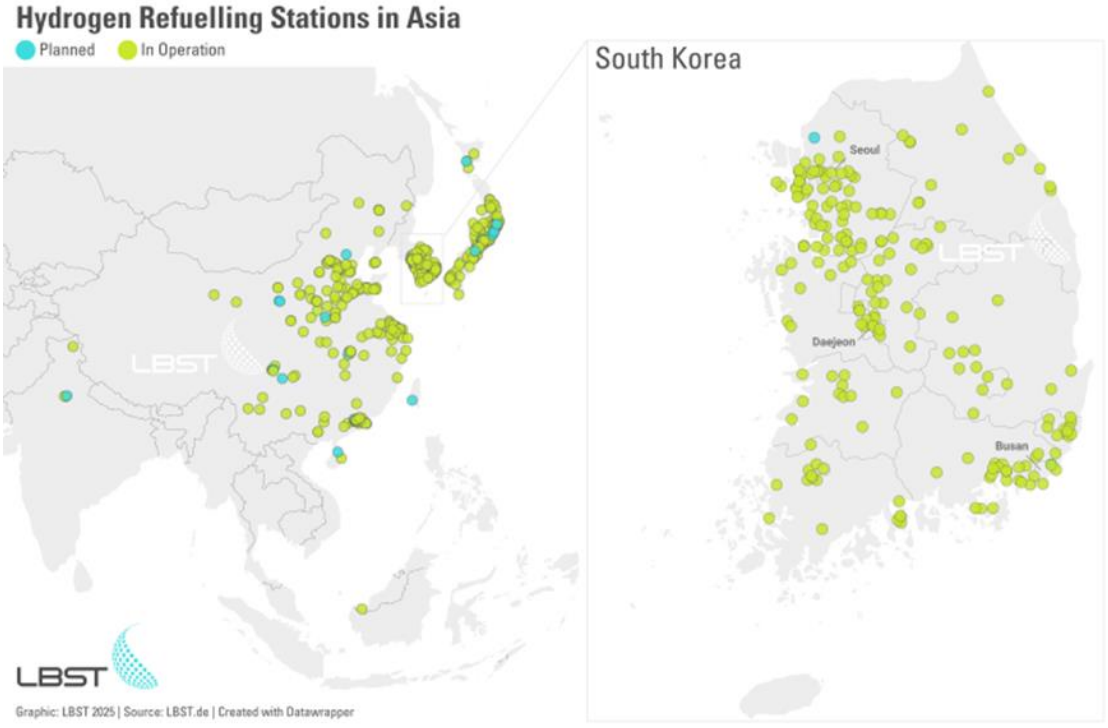


Рисунок 1 – Схема расположения водородных заправочных станций в Азии

Основной центр мирового развития водородной заправочной инфраструктуры сегодня сосредоточен в Азии, где расположено более половины всех действующих станций планеты. Европа занимает промежуточное положение, демонстрируя более сбалансированный, но всё ещё фрагментированный подход. Северная Америка и Россия, напротив, заметно отстают, хотя и имеют собственные амбициозные планы на будущее.

Азия: лидер глобального развития

Азиатский регион уверенно лидирует по количеству и динамике строительства водородных заправочных станций [8,9]. Высокие темпы роста здесь объясняется сочетанием мощной государственной поддержки, чётких долгосрочных стратегий декарбонизации и активного развития как легкового, так и грузового водородного транспорта.

- Китай – 384 заправочных станции (мировой лидер). Страна демонстрирует наиболее агрессивный подход, концентрируя объекты преимущественно в индустриальных кластерах, логистических центрах и регионах с интенсивным грузовым движением [8,9].
- Япония – 160-161 заправочных станций. Японская модель выделяется стремлением к максимально равномерному покрытию территории, что связано с ориентацией на массовое использование водородных автомобилей личного пользования [8,9].
- Южная Корея – 198 заправочных станций. Республика Корея реализует стратегию равномерного территориального покрытия с акцентом на развитие общественного транспорта, включая водородные автобусы.

Всего в Азии: около 748 водородных заправочных станций [8,9].

Такая концентрация позволяет Азии не только лидировать по абсолютным показателям, но и создавать синергетические эффекты между производством водорода, развитием транспорта и промышленностью.

Европа: коридорная модель развития

Европейский подход к созданию водородной инфраструктуры отличается большей сбалансированностью и ориентацией на основные транспортные коридоры (TEN-T). Станции преимущественно размещаются вдоль ключевых автомагистралей, вблизи крупных логистических узлов, портов и промышленных центров (рис. 2). При этом сохраняется значительная разница между отдельными странами.

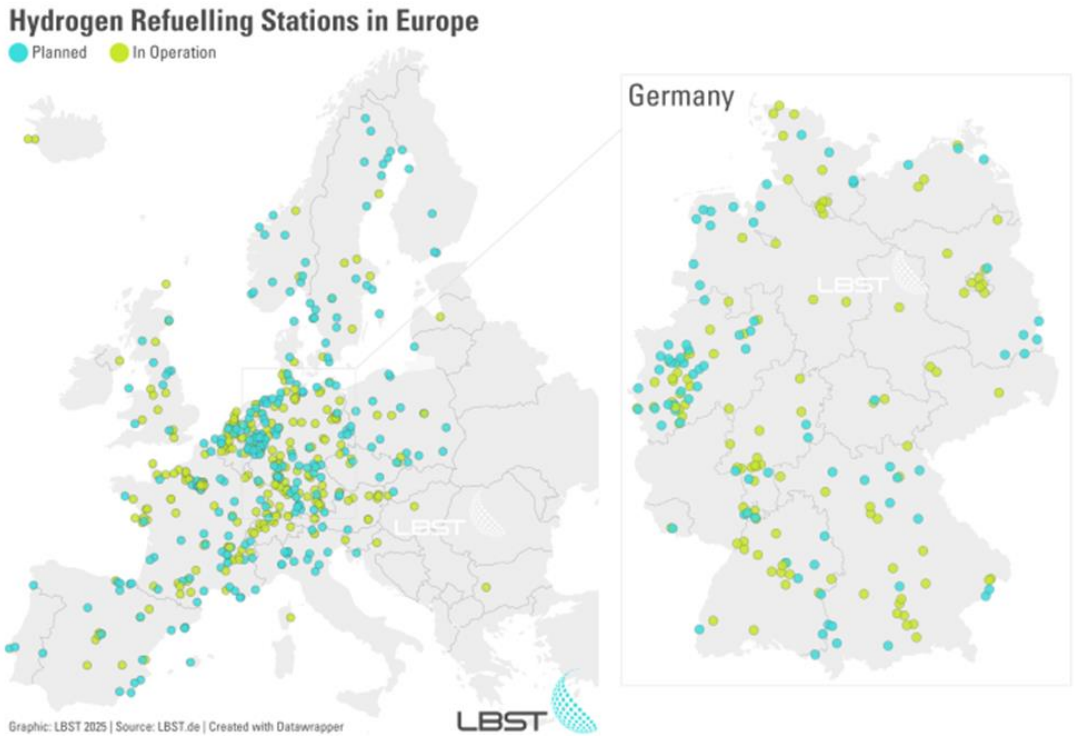


Рисунок 2 – Схема расположения водородных заправочных станций в Европе

- Германия – 113 заправочных станций (лидер Европы).
- Франция – 65 заправочных станций.
- Нидерланды – 25 заправочных станций.
- Швейцария – 19 заправочных станций.

Восточная и Юго-Восточная Европа пока практически не охвачены инфраструктурой, что создаёт заметный разрыв внутри самого континента. Европейская модель можно охарактеризовать как «коридорную» - она направлена на обеспечение непрерывных маршрутов для водородного транспорта на средние и дальние дистанции.

Северная Америка: локальный характер развития

В США развитие водородной заправочной инфраструктуры носит ярко выраженный локальный характер (рис. 3). Почти вся сеть (до 95 %) сосредоточена в штате Калифорния. За пределами этого региона плотность инфраструктуры приближается к нулю. Такая ситуация создаёт парадокс: одна из наиболее развитых экономик мира не обладает национальной системой водородных заправок.

- США – 50-90 заправочных станций.
- Канада – 10-12 заправочных станций.

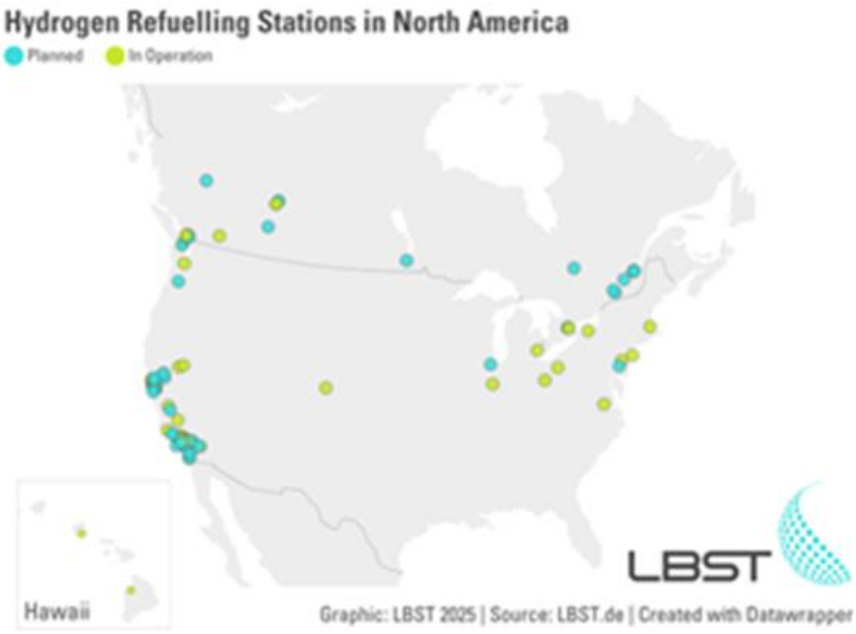


Рисунок 3 – Схема расположения водородных заправочных станций в Северной Америке

Несмотря на текущую концентрацию, в США и Канаде есть значительный потенциал роста. Федеральные и региональные программы предусматривают расширение инфраструктуры для грузового транспорта, что может стать катализатором для появления новых станций за пределами Калифорнии. Однако без более решительного перехода от «хабового» подхода к созданию связной национальной сети Северная Америка рискует и дальше отставать от азиатских лидеров по плотности заправочной инфраструктуры для легкового транспорта [8,9].

Плотность заправочных станций в России и перспективы развития

В России на текущий момент плотность водородных заправочных станций как экономико-географическая величина практически отсутствует [8]. Сеть находится на самой ранней, преимущественно экспериментальной стадии. Существующие объекты носят единичный характер и выполняют в первую очередь научно-исследовательские и демонстрационные функции (яркий пример – водородный кластер на Сахалине).

В отличие от Японии, Германии или Китая, где уже можно рассчитывать показатели плотности на 1 млн жителей или на 1000 км² территории, в России этот показатель на сегодняшний день стремится к нулю. Однако страна заявляет весьма амбициозные планы. Согласно «Концепции развития электрического и водородного транспорта до 2030 года», к концу десятилетия планируется создание более 1000 водородных заправочных станций [4].

При реализации этих планов Россия сможет сформировать базовую сеть вдоль ключевых федеральных трасс и в крупнейших агломерациях. Тем не менее, даже 1000 станций для такой огромной территории будет означать относительно низкую среднюю плотность по сравнению с лидерами (Японией, Германией, Южной Кореей).

Важной особенностью российской модели является её инвертированный характер [2,3,7]. Если в большинстве развитых стран сначала формируется спрос (автомобили, автобусы, грузовики), а затем под него строится заправочная инфраструктура, то в России приоритет отдаётся производственным мощностям, технологиям получения и хранения водорода, а также экспортному потенциалу. Заправочная инфраструктура для мобильного транспорта в этом контексте рассматривается как вторичный, производный элемент.

Такой подход имеет как преимущества (создание сильной технологической и производственной базы), так и очевидные риски – более медленный рост количества заправок и потенциальное отставание в развитии массового рынка водородного транспорта.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что глобальная инфраструктура водородных заправочных станций развивается крайне неравномерно. Мир чётко разделился на несколько моделей: Азия идёт впереди планеты всей благодаря мощной государственной поддержке и масштабным инвестициям, Европа строит более продуманную, но всё ещё фрагментированную «коридорную» сеть, а Северная Америка пока ограничивается одним крупным полигоном в Калифорнии. Россия же находится только в самом начале пути – фактическая плотность станций близка к нулю, однако заявленные планы к 2030 году выглядят весьма амбициозно [8,9,10].

Каждая страна и регион выбирают свой путь, исходя из собственных приоритетов. В Японии, Южной Корее и Китае акцент делается на создание удобной сети для пользователей уже сегодня. В Европе – на связность важнейших транспортных коридоров. В США и Канаде – на региональные хабы и тяжёлый транспорт. Россия же идёт своим, «инвертированным» путём: сначала производство и экспорт водорода, а уже потом – инфраструктура для автомобилей.

В ближайшие 5-7 лет картина может существенно измениться. Успех или неудача национальных стратегий будет зависеть не только от количества построенных станций, но и от того, насколько быстро появится реальный спрос со

стороны транспорта, особенно грузового и общественного. Те страны, которые смогут синхронизировать производство водорода, развитие автопарка и заправочную инфраструктуру, получат серьёзное конкурентное преимущество в будущем.

Пока же водородная заправочная сеть остаётся одним из самых ярких примеров того, как разные экономические модели и политические приоритеты формируют совершенно разную географию новой энергетической инфраструктуры.

Список литературы

1. Крылов, Д. А. Анализ проблем при транспортировке водорода, произведённого электролизом на базе электроэнергии АЭС, по магистральным газопроводам России / Д. А. Крылов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2023. – № 5 (461). – С. 30-38. – DOI 10.7868/S0233361923050063. – EDN OBHSOL.

2. Филиппов С. П., Ярославцев А. Б. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы, Успехи химии, 90:6 (2021), 627–643; Russian Chem. Reviews, 90:6 (2021), 627–643.

3. Сахабутдинов, Р. З. Перспективы развития водородной энергетики / Р. З. Сахабутдинов // Нефтяная провинция. - 2022. - № 1 (29). - С. 91-119. DOI https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.91-119.

4. Казаков М. Т. (2025). Перспективы и технологические вызовы внедрения водородного топлива в качестве основного энергоносителя для тяжелого грузового транспорта и морских судов // Академический исследовательский журнал, 3(5), 66–79. https://doi.org/10.25726/k3404-9648-7025-q.

5. Романов А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода // Научные записки молодых исследователей. 2023;11(3):73–80.

6. Водородная энергетика автомобильного транспорта: зарождение и современное состояние / В. М. Фомин, М. М. Бендик, М. И. Сидоров, С. А. Герасименко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – С. 155-160.

7. Стенина, И. А. Перспективы развития водородной энергетики. Полимерные мембраны для топливных элементов и электролизеров / И. А. Стенина, А. Б. Ярославцев // Мембраны и мембранные технологии. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 19-32. – DOI 10.31857/S2218117224010039. – EDN OKTNJZ.

8. IEA (2024), Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024, Licence: CC BY 4.0.

9. IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025, Licence: CC BY 4.0.

10. IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023, Licence: CC BY 4.0.

11. IEA, IRENA & UN Climate Change High-Level Champions (2023), Breakthrough Agenda Report 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023.

12. Isaac, N., & Saha, A. K. (2023). A Review of the Optimization Strategies and Methods Used to Locate Hydrogen Fuel Refueling Stations. Energies, 16(5), 2171. https://doi.org/10.3390/en16052171.

13. Yıldırım, E., & Budak, Y. (2025). Electrolyzer Systems as Hydrogen Refueling Stations: A Review of Capex, Opex, and LCOH Calculations. International Journal of Energy Horizon (IJEH), 1(1), 20-25. https://izlik.org/JA44GD55JG.

14. Koketsu, J., Ishigaki, A. (2025). Facility Location Problem of Stationary and Mobile Hydrogen Refueling Stations Considering Transport Risk for Hydrogen. In: Fukushige, S., Nonaka, T., Kobayashi, H., Tokoro, C., Yamasue, E. (eds) EcoDesign for Circular Value Creation: Volume II. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9076-0_19.

References

1. Krylov, D. A. Analysis of problems in the transportation of hydrogen produced by electrolysis using nuclear power plant electricity via main gas pipelines in Russia / D. A. Krylov // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2023. – No. 5(461). – Pp. 30-38. – DOI 10.7868/S0233361923050063. – EDN OBHSOL.

2. S. P. Filippov, A. B. Yaroslavtsev. Hydrogen Energy: Development Prospects and Materials, Uspekhi Khimii, 90:6 (2021), 627–643; Russian Chem. Reviews, 90:6 (2021), 627–643.

3. Sakhabutdinov, R. Z. Development Prospects of Hydrogen Energy / R. Z. Sakhabutdinov // Oil Province. – 2022. – No. 1 (29). – Pp. 91–119. DOI https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.91-119.

4. Kazakov M. T. (2025). Prospects and technological challenges of introducing hydrogen fuel as the main energy carrier for heavy cargo transport and sea vessels. Academic Research Journal, 3(5), 66–79. https://doi.org/10.25726/k3404-9648-7025-q.

5. Romanov A. S. Hydrogen Energy: A Comparative Analysis of Hydrogen Production Methods. Scientific Notes of Young Researchers. 2023;11(3):73–80.

6. Hydrogen energy for road transport: origins and current state / V. M. Fomin, M. M. Bendik, M. I. Sidorov, S. A. Gerasimenko // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2006. – Pp. 155-160.

7. Stenina I. A. Prospects for the development of hydrogen energy. Polymer membranes for fuel cells and electrolyzers / I. A. Stenina, A. B. Yaroslavtsev // Membranes and Membrane Technologies. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Pp. 19-32. – DOI 10.31857/S2218117224010039. – EDN OKTNJZ.

8. IEA (2024), Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024, License: CC BY 4.0.

9. IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025, License: CC BY 4.0.

10. IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023, License: CC BY 4.0.

11. IEA, IRENA and UN High-level Leaders on Climate Change (2023), Report on the Breakthrough Agenda for 2023, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023.

12. Isaac, N., and Sakha, A. K. (2023). A review of strategies and optimization methods used for locating hydrogen fueling stations. Energies, 16(5), 2171. https://doi.org/10.3390/en16052171.

13. Yıldırım, E., & Budak, Y. (2025). Electrolyzer systems as hydrogen refueling stations: a review of capital and operational-technical cost calculations and LCOH. The International Journal “Energy Horizon” (IJEH), 1 (1), 20-25. https://izlik.org/JA44GD55JG.

14. Kokesu, J., Ishigaki, A. (2025). The problem of locating stationary and mobile hydrogen refueling stations, taking into account the risk of hydrogen transportation. In: Fukusige S., Nonaka T., Kobayashi H., Tokoro S., Yamasue E. (eds.) Eco-Design for Creating Circular Value: Volume II. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9076-0_19.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_76-84
УДК 629.621.43.018

Поздеев И.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Колядин П.А.
старший преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Мураткин С.Е.
преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Pozdeev I.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Kolyadin P.A.
senior lecturer of the department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Muratkin S.E.
lecturer at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ПОЛИГОНЫ В США И ЯПОНИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ШИН: ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ

LANDFILLS IN THE USA AND JAPAN FOR TIRE TESTING: PROBLEMS, SOLUTIONS

Аннотация. В статье приведен аналитический обзор эволюционного развития шинных полигонов в США и Японии, их инфраструктуры и инновационных методов испытаний. Показано принципиальное отличие тестов для испытаний шин для различных мобильных транспортных средств. Полигоны постоянно модернизируются, вводятся новые испытательные треки, такие так специальные дороги по оценке на аквапланирование, движения на высоких скоростях на зимних участках дорог, крытые ледовые полигоны, полигоны для испытаний крупногабаритных шин для карьерных самосвалов грузоподъемностью свыше 400 тонн и другие.

Abstract. The article provides an analytical review of the evolutionary development of tire testing sites in the USA and Japan, their infrastructure and innovative testing methods. The fundamental difference between tire testing tests for various mobile vehicles is shown. Landfills are constantly being upgraded, new test tracks are being introduced, such as special aquaplaning assessment roads, high-speed traffic on winter road sections, covered ice ranges, testing grounds for large-sized tires for dump trucks with a lifting capacity of over 400 tons, and others.

© Поздеев И. А., Татаринцев В. Ю., Колядин П. А., Мураткин С. Е., Прядкин В. И., 2026

Ключевые слова: автомобильная шина, полигон, испытания, специальные дороги, искусственные неровности, комбинированные маршруты.

Keywords: car tires, landfills, tests, special roads, artificial bumps, combined routes.

Введение

Goodyear Tire & Rubber Company — это американская корпорация, одна из крупнейших мировых производителей шин. Компания создана 29 августа 1898 года предпринимателем Фрэнком Сейберлингом в городе Акрон, штат Огайо, США. Название дали в честь Чарльза Гудиера, который в 1839 году изобрел процесс вулканизации каучука. Фрэнк Сейберлинг купил старую фабрику и начал выпускать шины для велосипедов и повозок, а также шланги и прокладки. Уже через несколько лет компания наладила выпуск автопокрышек и заключила контракт с Генри Фордом на серийную поставку резины для легендарной модели Ford T [1, 2, 3].

Сегодня американская корпорация Goodyear производит шины для легковых машин, грузовиков, гоночной техники, самолетов и тяжелой промышленности, а также резинотехнические компоненты и полимеры. Компания Goodyer управляет десятками производственных центров по всему миру, выпуская сотни тысяч шин ежедневно. Заводы компании работают не только в США, но и в странах Европы.

Разработанные новые модели шин тщательно тестируется. Тесты проводятся самые разные: химические, ультразвуковые, инженерные, физические, математические, специальные и дизайнерские. Далее начинается этап тестирования в лабораториях. Это очень долгий и дорогостоящий процесс, который включает в себя как тесты на специальных платформах, так и лабораторные испытания. В зависимости от предназначения конкретной модели шины тестирование проводится по 50–100 специфическим критериям, которым должна соответствовать шина [1, 4, 5, 6].

Компания Goodyear использует сеть специализированных испытательных полигонов по всему миру для тестирования и разработки шин. Крупнейший полигон компании Сан-Анджело (Техас, США), основанный в 1944 году. Его площадь составляет около 29 кв. км, а протяженность дорог и трасс превышает 90 км. На полигоне имеется 53 различных типа дорожного покрытия (асфальт, бетон, грязь, гравий, вода) для проверки сцепления, износа и торможения. Ежегодно на полигоне тестирует порядка 23000 шин.

На полигоне в Сан-Анджело испытывают практически все виды продукции Goodyear для североамериканского и мирового рынков. Так, у легковых и

грузовых шин проверяется уровень сцепления, управляемость, торможение, шумность и износостойкость в экстремальных условиях. Для крупногабаритных шин имеется специальная зона для тестирования гигантских покрышек для строительной и карьерной техники. В рамках проекта NASA Artemis на полигоне проходят испытания безвоздушных шин для нового поколения лунных транспортных средств (Lunar Terrain Vehicle), разрабатываемых Goodyear в партнерстве с Lunar Outpost и General Motors.

В последние годы полигон прошел масштабную модернизацию. Создана уникальная асфальтированная зона площадью более 30 000 кв. м с уклоном ровным в 1 градус. Это позволяет поддерживать постоянный и равномерный поток воды для тестов на аквапланирование, при этом вся вода фильтруется и используется повторно по замкнутому циклу (рис. 1). Полигон исторически знаменит своим 8 км скоростным кольцом, на котором еще в 1963 году легендарный гонщик Эй-Джей Фойт установил замкнутый мировой рекорд скорости, превысив 322 км/ч.



Рисунок 1 – Проведение тестов шин на аквапланирование

Европейский полигон Миреваль расположен на юге Франции с гоночной трассой длиной около 3,3 км. Используется для испытаний легковых и грузовых шин на высоких скоростях движения. Заполярный полигон Ивало (Фин-

ляндия): предназначен для тестирования зимних шин и шин с шипами в экстремальных арктических условиях. Полигон предназначен для испытаний коммерческих и легковых шин. Полигон Кольмар-Берг (Люксембург) имеет испытательный трек рядом с главным инновационным центром компании в Европе. Полигон Американа (Бразилия) является центром тестирования и испытаний шин для южноамериканского рынка [2, 4].

В настоящее время компания Goodyear активно развивает интеграцию шин с системами автономного вождения. Компания является единственным шинным производителем, сотрудничающим с исследовательским центром автономного транспорта **Mcity.** На полигонах моделируются сложные городские и пригородные условия для цифрового взаимодействия шины со встроенными датчиками и искусственного интеллекта беспилотников. Компания широко внедряет технологии AI Mixing для поиска оптимальных составов резиновых смесей с помощью искусственного интеллекта.

Так же проводят испытания в рамках экосистемы Goodyear SightLine и интеллектуальных решений для коммерческого транспорта. При проведении испытаний производят калибровку датчиков, которые измеряют износ протектора и давление в реальном времени, нагрузку на ось и температуру в шине, коэффициент сцепления с дорожным полотном, мгновенно передавая данные в бортовой компьютер автомобиля для адаптации систем ABS и ESP.

Для испытаний шин электрокаров на полигонах создаются специализированные зоны – акустические треки, на которых производят замер ультранизкого уровня шума и динамические зоны для оценки износостойкости резиновых смесей при резких стартах, характерных для электродвигателей. Шум шины на разных скоростях записывается на магнитофон, после чего расшифровывается в специальных акустических лабораториях, где выявляется, при какой частоте шум, производимый протектором, может быть неприятен для водителя. Проведение дополнительных испытаний обусловлено тем, что электрокары требуют от шин повышенной прочности из-за высокого крутящего момента и веса батарей и минимального уровня шума при эксплуатации в городских условиях.

Полигоны компания Goodyear выступают площадкой для долгосрочных тестов шин, созданных из экологически чистых компонентов (рисовая шелуха, соевое масло, био-силиoptions) с целью доведения доли экологичного сырья в шине до 100%.

Одним из ведущих производителей шин в Японии является компания Yokohama Rubber Company, которая была основана в Японии в **1917 году.**

За более чем 100-летнюю историю компания заслужила авторитет надёжного поставщика высококачественных шин для легковых автомобилей, внедорожников, гоночных болидов, грузовиков, коммерческой, сельскохозяйственной и строительной техники. Yokohama входит в топ мировых производителей автомобильной резины, поставляя продукцию на первичную комплектацию для ведущих мировых марок автомобилей и развивая зелёные технологии переработки [7].

В 2008 году Yokohama построила завод неподалёку от Липецка и инвестировала в создание местной компании «Йокохама РПЗ». Завод оснастили современным японским и европейским оборудованием, а новые сотрудники получили возможность пройти квалифицированную подготовку в Японии. После временного простоя в 2022 году предприятие вернулось к обычному режиму работы. Численность персонала завода составляет 760 человек, а максимальная производительность достигает почти 2 млн шин в год (рис. 2).



Рисунок 2 – Завод по производству шин компании Yokohama в России

Компания производит большую линейку шин для наземных транспортно-технологических машин. Тестирование шин производится на полигонах, основной полигон Yokohama Rubber — Test Center of Hokkaido (TTCH) в г. Асахикаве (Япония, открыт в 2015 г.), площадью около 900 тыс. кв. м, предназначен для испытаний зимних и летних шин. В 2023 году там открыли крупнейший крытый ледовый комплекс в Японии, позволяющий тестировать шины на льду при скорости до 100 км/ч, а также проверять разгон и торможение. Основной полигон для легковых, грузовых и автобусных шин расположен в г. Хоккайдо (Япония). Комплекс включает снежные трассы, ледовые арены и участки для летних испытаний. Центр испытаний в Швеции используется специально для проверки характеристик зимних шин. Полигон в Таиланде имеет специальные дороги для тестов на устойчивость к аквапланированию, позволя-

ющие проверять способность протектора рассеивать воду. Эти полигоны позволяют компании проводить всесторонние испытания продукции, обеспечивая высокую безопасность и производительность шин.

С момента открытия полигона Yokohama Rubber в декабре 2015 г. компания внедрила более передовые и сложные методы тестирования и оценки в рамках глобального расширения своего шинного бизнеса.

В январе 2018 года TTCH открыл свой первый крытый комплекс с ледовым треком для испытаний зимних шин. В ноябре 2020 года объект был модернизирован путем установки крупнейшего в Японии внутреннего блока охлаждения, который позволяет поддерживать температуру поверхности льда в диапазоне от –10°C до 0°C. Новая площадка создана для совершенствования характеристик управляемости шин Yokohama на поворотах на льду — это является важнейшим параметром для зимних условий наряду с длиной тормозного пути. По сравнению с испытательными полигонами под открытым небом, новый закрытый комплекс не подвержен влиянию погодных условий, а состояние ледового покрытия можно поддерживать стабильно. Это обеспечивает точность данных, получаемых в ходе испытаний, и способствует более эффективной разработке новых решений и технологий. Тестовая площадка расположена в здании размером 56×56 метров с высотой потолков 12,3 метра, а ледовое покрытие площадью 1960 м2 позволяет проводить испытания при радиусах поворота 10–22 м. Новый испытательный полигон находится рядом с ранее созданной крытой испытательной площадкой, что будет способствовать проведению эффективных комбинированных испытаний с использованием обоих полигонов. Это также позволит ускорить разработку зимних шин, обеспечивающих высочайший уровень безопасности в зимних условиях (рис. 3).

В дополнение к испытательному полигону зимних шин в TTCH, Yokohama Rubber также проводит тесты в испытательном центре компании в Швеции (YTCS). В TTCH проводятся испытания шин YOKOHAMA для рынков по всему миру, а YTCS проводит дополнительные тесты, чтобы подтвердить характеристики шин для продажи в Европе. Два испытательных полигона обеспечивают идеальное соответствие выпускаемых шин зимним дорожным условиям в стране или регионе использования.

Компания Yokohama закончила проект по расширению своего испытательного полигона Tire Test Center of Asia (TTCA) Комплекс Tire Test of Asia был открыт в апреле 2009 года. Первоначально полигон площадью 1,69 миллиона квадратных метров включал в себя 4,1-километровый скоростной трек с

километровой прямой, позволяющей тестировать шины при скорости свыше 200 км/ч, многоцелевой трек общей площадью более 100 000 квадратных метров, 4,2-километровую секцию, окружающую скоростной трек и имитирующую типичные для Азии дорожные условия, а также участок со специальными неровностями для тестов на прочность.



Рисунок 3 – Крупнейший в Японии крытый ледовый полигон Yokohama Rubber-Abiznews

На километровом многоцелевом треке можно оценивать поведение шин во время резкого объезда препятствия, и там же находятся участок для тестов на мокрой поверхности и специальная секция, позволяющая испытывать шины на уровень комфорта и шума. Теперь полигон Yokohama включает в себя четыре новых трека – 2,5-километровый участок для тестов на сухой поверхности, трек длиной 1,5 км для испытаний на мокром покрытии, круговой трек и участок для тестов на поперечное аквапланирование. Два трека для испытаний на управляемость позволяют оценивать поведение шин на различных автомобилях на сухой и мокрой поверхности, а на круговом треке испытывается боковое сцепление покрышек на мокром покрытии. Секция для тестов на устойчивость к аквапланированию предназначена для проверки того, как быстро рисунок протектора позволяет рассеивать воду. После завершения строительства Yokohama получила возможность проводить в Таиланде все тесты, необходимые для разработок новых шин.

Заключение

1. Компания Goodyear является одним из старейших производителей шин в мире. Располагает широкой сетью испытательных полигонов. На полигонах моделируются сложные городские и пригородные условия для цифрового взаимодействия шины со встроенными датчиками и искусственного интеллекта беспилотников.

2. Компания Yokohama за свою вековую историю внесла значительный вклад в развитие мировой шинной индустрии. Компания чтит традиции и стремится внести вклад в качество жизни своих клиентов и жизнь общества. Yokohama активно развивает «зелёные» технологии и регулярно выпускает всё более безопасные для экологии модели шин.

Список литературы

1. Вахламов, В. К. Автомобили: Эксплуатационные свойства : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Вахламов. - М.: Издательский центр "Академия", 2005. - 240 с.

2. Евзович, В. Е. Автомобильные шины, диски и ободья / В. Е. Евзович, П. Г. Райбман. - М.: Автополис- плюс, 2010. - 144 с.

3. Бакфиш, К. Новая книга о шинах / К. Бакфиш, Д. Хайнц. – М.: ООО «Издательство Астрель», ООО «Издательство АСТ», 2003. - 303 с.

4. Безверхий, С. Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификации автомобилей / С. Ф. Безверхий, Н. Н. Яценко. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 600 с.

5. Гуслицер, Р. Л. Шины и автомобиль / Р. Л. Гуслицер. – М., 2007. – 283 с.

6. Испытания автомобилей / В. Б. Цимбалин, В. Н. Кравец, С. М. Кудрявцев, И. Н. Успенский, В. И. Песков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

7. UNECE Regulation No. 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or adhesion on wet surfaces and/or rolling resistance – URL: https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120 (дата обращения: 02.09.2026).

References

1. Vakhlamov, V. K. Cars: Operational Properties : Textbook for students of higher educational institutions / V. K. Vakhlamov. – Moscow: Publishing Center “Academy”, 2005. – 240 p.

2. Evzovich, V. E. Car Tires, Rims and Wheels / V. E. Evzovich, P. G. Raibman. - Moscow: Avtopolis-Plus, 2010. – 144 p.

3. Bakfish, K. A New Book about Tires / K. Bakfish, D. Heinz. – Moscow: 000 “Astrel Publishing House”: 000 “ACT Publishing House”, 2003. – 303 p.

4. Bezverkhiy, S. F. Fundamentals of Technology for Field Testing and Vehicle Certification / S. F. Bezverkhiy, N. N. Yatsenko. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1996. – 600 p.

5. Guslitser, R. L. Tires and the Car / R. L. Guslitser. – Moscow, 2007. – 283 p.

6. Car Testing / V. B. Tsimbalin, V. N. Kravets, S. M. Kudryavtsev, I. N. Uspensky, V. I. Peskov. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 199 p.

7. UNECE Regulation No. 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or adhesion on wet surfaces and/or rolling resistance. – URL: https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120 (accessed: 02.09.2026).

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_85-90
УДК 629.3.022

Сотников Д.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Колядин П.А.
старший преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Sotnikov D.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Kolyadin P.A.
senior lecturer of the department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ РОССИЙСКИХ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

AUTOMATIC TRANSMISSION GEARS FOR RUSSIAN TRUCKS

Аннотация. В статье рассмотрены конструкции коробок передач с автоматическим управлением грузовых магистральных автомобилей-тягачей Российского производства. Определены основные технические особенности и текущее состояние применения коробок передач на автомобилях КамАЗ-5490.

Abstract. The article examines the designs of automatic transmission systems for Russian-made long-haul truck tractors. The main technical features and the current state of application of automatic transmission systems on KamAZ-5490 vehicles are identified.

Ключевые слова: автомобиль, трансмиссия, коробка передач, седельный тягач, грузовик.

Keywords: car, transmission, gearbox, truck tractor, truck.

Введение

Повышение эффективности перевозок грузов на дальние расстояния – одна из задач современного автомобилестроения. Способом решения данной проблемы является применение на магистральных тягачах коробок передач с автоматическим управлением, что позволяет упростить и облегчить управление автомобилем, снизить средний расход топлива и увеличить быстродействие выбора

© Сотников Д. А., Колядин П. А., Татаринцев В. Ю., Прядкин В. И., 2026

режима работы трансмиссии [1, 2]. За рубежом распространение получили механические вальные коробки передач с автоматическим управлением, благодаря высокому КПД сочетающие в себе все вышеприведенные требования [3, 4].

Отечественное автомобилестроение освоило совсем недавно освоило установку данных типов трансмиссий на грузовые автомобили, что дало возможность повысить уровень производства автомобилей до передовых образцов зарубежной техники.

Цель работы

Выполнить анализ конструкций коробок передач с автоматическим управлением отечественных седельных магистральных тягачей КамАЗ.

Результаты и обсуждение

На автомобилях Камского автомобильного завода в 2013 годувпервые сошёл с конвейера первый серийный седельный тягач семейства КамАЗ-5490, на котором предполагалась установка как классической механической трансмиссии с коробкой передач с ручным управлением, так и установка новой для завода автоматической роботизированной коробки передач немецкого производителя ZF (Zahnradfabrik Friedrichshafen) AS Tronic 12AS2130 TD.

Коробка передач ZFASTronic 12AS2130 TD (рис. 1) имеет однодисковое сцепление сухого трения, четырехступенчатая основная коробка передач (с учетом задней передачи) с двумя промежуточными валами, передний делитель, позволяющей добиться разбиения ряда передаточных чисел на дополнительные «половинки» и задний демультипликатор с двумя передачами. Дополнительно в коробку передач штатно встраивается трансмиссионный тормоз-замедлитель (интардер). Таким образом коробка передач имеет 12 передач для движения вперед и две передачи заднего хода.

Следующим поколением коробок передач, устанавливаемых на уже модернизированный грузовик КамАЗ-54901, стали ZF TraXon (рисунок 2). Впервые данная трансмиссия, начала устанавливаться на опытно-промышленной партии и далее серийно с 2019 года. ZF TraXon в отличие отZFASTronic, обладает большим диапазоном по изменению передаточных чисел в коробке передач, меньшей шумностью при работе и модульностью конструкции (установка любого типа сцепления и дополнительных агрегатов).

По конструкции выбранные модификации коробки передач ZF TraXon имеет сухое однодисковое сцепление сухого трения, два промежуточных вала, задний двухступенчатый делитель и двухступенчатый демультипликатор.

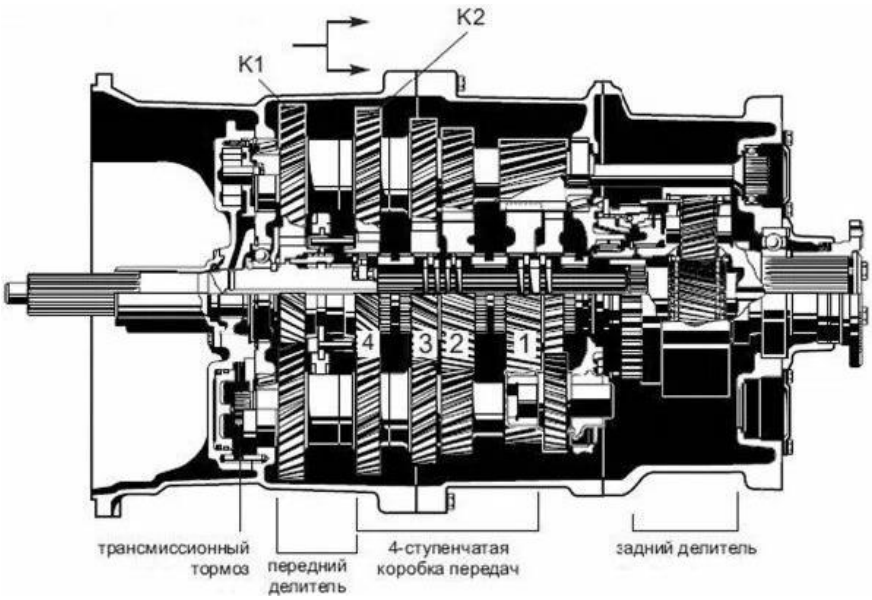


Рисунок 1 – Коробка передач ZF AS Tronic 12AS2130 TD

В основной коробке передач имеется 3 передачи переднего хода и 1 – заднего. Всего коробка передач имеет 12 передач для движения вперёд и две передачи заднего хода (табл. 1).

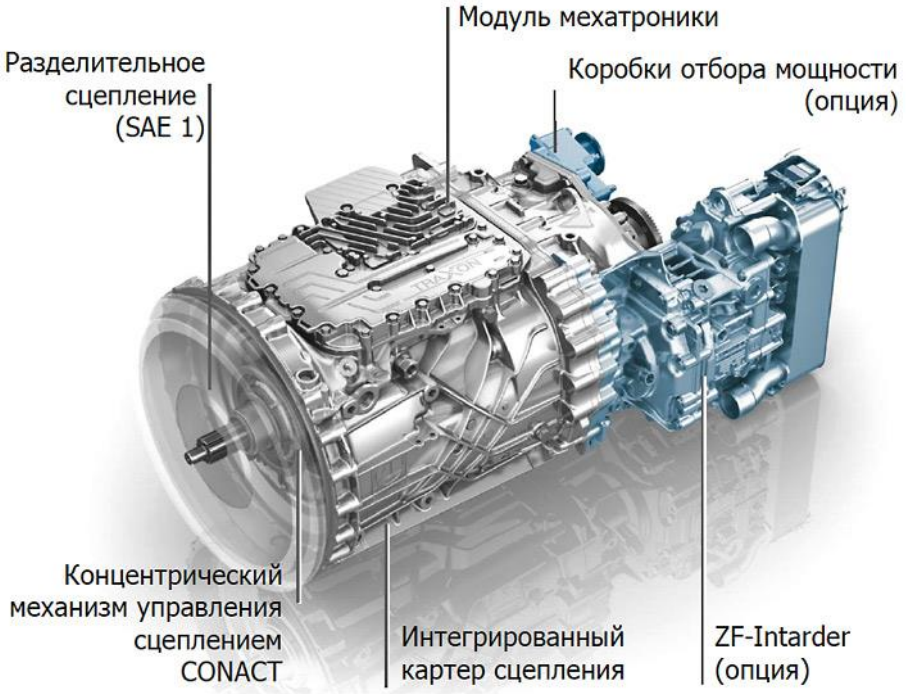


Рисунок 2 – Коробка передач ZFTraXonZF 12TX2210 TD

Опционально коробка может оснащаться встроенным интардером и коробкой отбора мощности. Одной из особенностей ZF TraXon является наличие режима EcoRoll, позволяющая использовать коробку передач в нейтральном режиме во время движения (отключая коробку).

В 2022 году, в связи с введением санкционных мер по отношению к Российской Федерации, поставки трансмиссий ZF на завод КамАЗ прекращаются. Производство грузовых автомобилей КамАЗ-54901 с автоматической трансмиссией могло полностью остановится. Однако в 2023 году вновь началось производство седельного магистрального тягача, на котором вместо коробки передач ZF TraXon начали серийно устанавливать коробки передач компании Shaanxi Fast Auto Drive Co Ltd (Fast Group), а именно Fast GearF12JZ22DD и F12JZ24DD.

Таблица 1 – Передаточные числа коробки передач TraXon ZF 12TX2210 TD

№, п/п	**Передача**	**Передаточное число**
1	первая	16,688
2	вторая	12,924
3	третья	9,926
4	четвертая	7,688
5	пятая	5,895
6	шестая	4,565
7	седьмая	3,655
8	восьмая	2,831
9	девятая	2,174
10	десятая	1,684
11	одиннадцатая	1,291
12	двенадцатая	1
13	первая задняя	16,918
14	вторая задняя	13,102

Коробки передач Fast GearF12JZ22DD и F12JZ24DD имеют конструктивную компоновку, аналогичную ранее применяющимся трансмиссиям ZF: однодисковое сцепление сухого трения, два промежуточных вала, двухступенчатые делитель и демультипликатор. Максимальный передаваемый крутящий момент возрос до 2400 кН, а число передач осталось прежним. Передаточные числа коробки передач также другие (таблица 2) при их общем количестве – 12 передач для движения вперед и 2 – заднего хода.

Технические характеристики Fast GearF12JZ24DD:

1. Масса – 298 кг;
2. Габаритная длина – 951 мм;
3. Объём заправляемого масла – 15 л.

Таблица 2 – Передаточные числа коробки передач Fast Gear F12JZ24DD

№ п/п	Передача	Передаточное число
1	первая	15,53
2	вторая	12,08
3	третья	9,39
4	четвертая	7,33
5	пятая	5,73
6	шестая	4,46
7	седьмая	3,48
8	восьмая	2,71
9	девятая	2,10
10	десятая	1,64
11	одиннадцатая	1,28
12	двенадцатая	1
13	первая задняя	14,86
14	вторая задняя	11,56

Начиная с 2024 года коробки передач Fast Gear начали массово устанавливаться на «импортозамещенную» версию седельного тягача КамАЗ-54901 К-5, которая производится вплоть до сегодняшних дней.

Выводы

Начиная с 2013 года отечественные седельные тягачи КамАЗ имеют штатно-устанавливаемую автоматическую трансмиссию различных производителей, что дает возможность грузовому автомобилю семейства КамАЗ-5490 встать в один ранг с другими зарубежными производителями. Таким образом автомобиль КамАЗ-54901 – современный автомобиль, отвечающий большинству современных требований к магистральному тягачу.

Список литературы

1. Дыко, Г. А. Применение автоматизированных коробок передач на грузовых автомобилях / Г. А. Дыко, Т. А. Опейкина // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Минск, 26–29 мая 2020 года. В 2-х томах. Том 1. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2020. – С. 54-58. – EDN MWNULC.

2. Маливанов, И. А. Анализ перспектив установки гидромеханических коробок передач на грузовые и специальные автомобили / И. А. Маливанов, Ю. М. Гальцев, Д. В. Конорев // Общество, интеллект, инициатива в контексте междисциплинарных исследований : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Воронеж, 19 сентября 2024 года. – Стерлитамак: ООО "Агентство международных исследований", 2024. – С. 130-132. – EDN ONMVVH.

3. Новая коробка передач грузовых автомобилей / Р. Г. Хабибуллин, В. В. Волошко, И. Р. Мавлеев [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 6(89). – С. 16-19. – EDN THDEBP.

4. Новая коробка передач грузового автомобиля / В. В. Волошко, И. Р. Мавлеев, И. И. Салахов, Х. А. Фасхиев // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 15-17. – EDN TRKTFJ.

References

1. Dyko, G. A. Application of automated transmissions in trucks / G. A. Dyko, T. A. Opeykina // Automotive and Tractor Engineering and Road Transport : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 26–29, 2020. In 2 volumes. Volume 1. – Minsk: Belarusian National Technical University, 2020. – P. 54-58. – EDN MWNULC.

2. Malivanov, I. A. Analysis of prospects for installing hydromechanical transmissions on trucks and special-purpose vehicles / I. A. Malivanov, Yu. M. Galtsev, D. V. Konorev // Society, Intelligence, and Initiative in the Context of Interdisciplinary Research: Collection of articles based on the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, September 19, 2024. – Sterlitamak: International Research Agency LLC, 2024. – P. 130-132. – EDN ONMVVH.

3. New truck transmission / R. G. Khabibullin, V. V. Voloshko, I. R. Mavleev [et al.] // Journal of Automotive Engineers. – 2014. – No. 6(89). – P. 16-19. – EDN THDEBP.

4. New truck transmission / V. V. Voloshko, I. R. Mavleev, I. I. Salakhov, Kh. A. Faskhiev // Automotive Industry. – 2015. – No. 4. – P. 15-17. – EDN TRKTFJ.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_91-97
УДК 629.331.4

Сотников Д.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Поздеев И.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Остапенко И.В.
техник кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Sotnikov D.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pozdeev I.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Ostapenko I.V.
Technician of the department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

АВТОМОБИЛИ НА ВОДОРОДЕ: ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

HYDROGEN-POWERED CARS: STAGES OF DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT

Аннотация. В статье рассматриваются современные автомобили, использующие водород в качестве топлива. Описан принцип работы топливного элемента, благодаря которому такие транспортные средства по сути являются электромобилями с собственным генератором электроэнергии. Проанализированы ключевые преимущества водородной технологии: экологическая чистота (выброс только водяного пара), быстрая заправка, большой запас хода и устойчивость к низким температурам. Приведены примеры серийных моделей (Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Aurus Senat NAMI Hydrogen) и перспективных концептов (BMW iX5 Hydrogen, Honda CR-V FCEV, Hyperion XP-1). Отдельное внимание уделено существующим барьерам — высокой стоимости, слаборазвитой инфраструктуре заправок, сложностям хранения водорода и неэкологичности его производства. Рассмотрены ниши, где водородный транспорт наиболее эффективен, а также текущее состояние и перспективы развития технологии в России. Сделан вывод о большом потенциале водородных автомобилей при условии решения инфраструктурных и экономических проблем.

Abstract. The article discusses modern cars that use hydrogen as fuel. The principle of operation of a fuel cell is described, due to which such vehicles are essentially electric vehicles with their own electric power generator. The key advantages of hydrogen technology are analyzed: environmental cleanliness (emission of only water vapor), fast refueling, large power reserve and resistance to low temperatures. Examples of production models (Toyota Mirai, Hyundai Nexo,

© Сотников Д. А., Поздеев И. А., Остапенко И. В., Прядкин В. И., 2026

Aurus Senat NAMI Hydrogen) and promising concepts (BMW iX5 Hydrogen, Honda CR-V FCEV, Hyperion XP-1) are given. Special attention is paid to the existing barriers — high cost, underdeveloped infrastructure of gas stations, difficulties in storing hydrogen and the lack of environmental friendliness of its production. The niches where hydrogen transport is most effective are considered, as well as the current state and prospects of technology development in Russia. The conclusion is made about the great potential of hydrogen cars provided that infrastructural and economic problems are solved.

Ключевые слова: водородный автомобиль, топливный элемент, экологичность транспорта, электромобиль, водородная заправка, запас хода, Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Aurus Senat, зелёный водород, низкоуглеродная энергетика.

Keywords: hydrogen car, fuel cell, environmental friendliness of transport, electric car, hydrogen refueling, power reserve, Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Aurus Senat, green hydrogen, low carbon energy.

Введение

В последние годы водородный транспорт всё чаще рассматривается как одна из ключевых технологий, способных изменить будущее автомобильной отрасли. По своей сути водородный автомобиль мало чем отличается от классического электромобиля — здесь тоже установлен электродвигатель, но источник энергии иной. Вместо громоздкой литий-ионной батареи в таких машинах применяется топливный элемент, внутри которого протекает химическая реакция между водородом и кислородом. Результатом этой реакции становится электричество, питающее мотор, а единственным выбросом в атмосферу — водяной пар. Именно это делает водородную технологию одной из самых экологически чистых среди всех существующих видов автомобильного транспорта.

Если рассматривать принцип работы более детально, то он выглядит следующим образом. Водород, хранящийся в специальных баках под высоким давлением, подаётся в топливный элемент. Там молекулы газа расщепляются на протоны и электроны. Электроны устремляются по внешней цепи, создавая электрический ток, который приводит в движение электромотор. Протоны же проходят через мембрану и соединяются с кислородом, поступающим из окружающего воздуха, образуя всё тот же водяной пар. Никаких других выхлопов — ни углекислого газа, ни оксидов азота, ни сажи — эта система не даёт.

Почему же водородная технология считается настолько перспективной? Причин несколько. Прежде всего это абсолютная экологичность при движении. Затем — быстрая заправка: заполнить водородный бак можно всего за три-пять минут, как бензиновый автомобиль, а не за часы, как обычный электрокар. Запас хода современных водородных моделей составляет от 500 до 870 километров без дозаправки, что сопоставимо или даже превосходит показатели машин с двигателем внутреннего сгорания. Кроме того, топливные элементы практиче-

ски не теряют эффективность на морозе, в отличие от аккумуляторных батарей, которые на холоде быстро разряжаются. Срок службы такого элемента достигает 8–10 лет, что дольше, чем у большинства тяговых батарей электромобилей.

Уже сегодня существуют серийные модели водородных автомобилей, доказывающие готовность технологии к реальной эксплуатации. Яркий пример — Toyota Mirai второго поколения, которая способна проехать до 650 километров и развивает мощность 182 лошадиные силы. Южнокорейский кроссовер Hyundai Nexo с запасом хода 609 километров активно продаётся в Корее и Европе. Есть и российская разработка — Aurus Senat NAMI Hydrogen (рис. 1), созданный на базе премиального седана. Этот автомобиль обладает запасом хода до 870 километров, мощностью 1020 лошадиных сил и разгоняется до сотни менее чем за четыре секунды.



Рисунок 1 – Aurus Senat NAMI Hydrogen

Помимо серийных машин, существуют и перспективные концепты. Немецкий BMW iX5 Hydrogen — это пилотный проект с запасом хода 503 километра и мощностью около 410 лошадиных сил, хотя его серийный запуск ожидают не ранее 2025 года (рис. 2).



Рисунок 2 – BMW iX5 Hydrogen

Honda CR-V FCEV (рис. 3) представляет собой гибрид: автомобиль может заряжаться от розетки для коротких ежедневных поездок и заправляться водородом для дальних путешествий.



Рисунок 3 – Honda CR-V FCEV

А американский гиперкар Hyperion XP-1 (рис. 4) — это настоящий технологический прорыв: запас хода до 1635 километров и разгон до 100 км/ч за 2,3 секунды демонстрируют, на что способна водородная технология в перспективе.



Рисунок 4 – Hyperion XP-1

Однако было бы ошибкой полагать, что водородный транспорт уже готов к массовому распространению. Существует ряд серьёзных барьеров. Самый главный — высокая стоимость. Производство топливных элементов требует дорогих материалов, в частности платины, что делает и сами автомобили, и их об-

служивание очень дорогими. Водород сложно хранить и транспортировать: это крайне лёгкий газ, поэтому его приходится сжимать до давления в 700 атмосфер, а баки изготавливать из специального углепластика. Инфраструктура водородных заправок развита крайне слабо: в мире их мало, а в России действуют всего две-три станции — в Москве и Сочи. Парадоксально, но и с экологичностью не всё гладко: до 95 процентов водорода сегодня получают из природного газа методом паровой конверсии, что сопровождается выбросами вредных веществ. Так называемый зелёный водород, который добывают из воды с помощью электролиза с использованием возобновляемой энергии, пока остаётся слишком дорогим. Есть и вопросы безопасности: водород легко воспламеняется, поэтому требуются особые системы защиты и специальное обучение водителей и персонала заправок. Кроме того, водородные автомобили вынуждены конкурировать с обычными электромобилями, у которых инфраструктура зарядок уже хорошо развита, а стоимость эксплуатации ниже.

Несмотря на это, существуют ниши, где водородный транспорт может оказаться даже эффективнее батарейных электромобилей. В первую очередь это тяжёлые грузовики и автобусы, для которых батареи слишком тяжелы и требуют слишком долгой зарядки. Водородные поезда — такие проекты уже работают в Германии и Японии — также показывают свою эффективность. Карьерная и специальная техника, работающая в удалённых районах, где нет развитой зарядной инфраструктуры, морские суда для дальних перевозок — во всех этих сферах водород может занять свою уникальную нишу.

Что касается России, здесь водородный транспорт находится пока на начальной стадии. Существуют отдельные прототипы — уже упомянутый Aurus Senat Hydrogen и экспериментальные грузовики КАМАЗ. Действуют две-три водородные заправки в Москве и Сочи. Есть стратегия развития водородной инфраструктуры до 2030 года, и водород рассматривается как часть общей низкоуглеродной энергетической стратегии страны. Пока это лишь пилотные проекты, но потенциал для развития, безусловно, есть.

Выводы

Водородные автомобили представляют собой экологически чистую альтернативу традиционному транспорту с двигателем внутреннего сгорания. Они сочетают в себе большой запас хода, быструю заправку и устойчивость к холоду, что делает их весьма привлекательными. Уже существуют как серийные модели, так и перспективные прототипы, подтверждающие работоспособность

технологии. Однако главными препятствиями на пути к массовому внедрению остаются высокая стоимость, нехватка заправочной инфраструктуры, сложности хранения водорода и неэкологичность его текущего производства. Наиболее реалистичный сценарий развития предполагает, что водородные автомобили займут свою нишу прежде всего в тяжёлом грузовом и общественном транспорте, а также в логистике и спецтехнике. В легковом сегменте они будут дополнять обычные электромобили, а не вытеснять их. Технология обладает огромным потенциалом, но её массовое внедрение потребует значительных инвестиций и времени. Будущее, скорее всего, за мультитопливным подходом, где водород, электричество и традиционное топливо будут сосуществовать, каждый в своей сфере.

Список литературы

1. Toyota Motor Corporation Toyota Mirai – URL: Toyota Mirai Official (дата обращения: 26.05.2026).

2. Hyundai Motor Company Hyundai NEXO – URL: Hyundai NEXO Official (дата обращения: 26.05.2026).

3. BMW BMW iX5 Hydrogen – URL: BMW Hydrogen Official (дата обращения: 26.05.2026).

4. Honda Motor Co. Honda CR-V e: FCEV – URL: Honda Hydrogen Official (дата обращения: 26.05.2026).

5. Hyperion Companies Hyperion XP-1 – URL: Hyperion XP-1 Official (дата обращения: 26.05.2026).

6. Борисов, В. И. Водородная энергетика и транспорт / В. И. Борисов. – М.: Инфра-Инженерия, 2022. – 312 с.

7. Смирнов, С. В. Топливные элементы и перспективы их использования в автомобильной промышленности / С. В. Смирнов // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 2. – С. 33–39.

8. Международное энергетическое агентство (IEA). Global Hydrogen Review 2025. – URL: IEA Global Hydrogen Review (дата обращения: 26.05.2026).

9. Министерство энергетики Российской Федерации. Стратегия развития водородной энергетики в Российской Федерации до 2030 года. – URL: https://minenergo.gov.ru/ (дата обращения: 26.05.2026).

References

1. Toyota Motor Corporation Toyota Mirai – URL: Toyota Mirai Official (accessed: 05/26/2026).

2. Hyundai Motor Company Hyundai NEXO – URL: Hyundai NEXO Official (accessed: 05/26/2026).

3. BMW BMW iX5 Hydrogen – URL: BMW Hydrogen Official (accessed: 05/26/2026).

4. Honda Motor Co. Honda CR-V e:FCEV – URL: Honda Hydrogen Official (accessed: 05/26/2026).

5. Hyperion Companies Hyperion XP-1 – URL: Hyperion XP-1 Official (accessed: 05/26/2026).

6. Borisov V. I. Hydrogen energy and transport. Moscow: Infra-Engineering, 2022. – 312 p.

7. Smirnov S. V. Fuel cells and prospects for their use in the automotive industry // The automotive industry. - 2024. – No. 2. – pp. 33-39.

8. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2025 – URL: IEA Global Hydrogen Review (accessed: 05/26/2026).

9. Ministry of Energy of the Russian Federation. Strategy for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation until 2030. – URL: https://minenergo.gov.ru/ (accessed: 05/26/2026).

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_98-110
УДК 629.621.43.018

Сотников Д.А.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Артёмов А.В.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Школьных А.В.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Sotnikov D.A.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Artemov A.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Shkolnykh A.V.
assistant at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ПОЛИГОНЫ В ЕВРОПЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ШИН: ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ

LANDFILLS IN EUROPE FOR TIRE TESTING: PROBLEMS AND SOLUTIONS

Аннотация. В статье приведен аналитический обзор влияния шины автомобилей на окружающую среду при их эксплуатации. Приведены основные пути снижения экологической нагрузки на окружающую среду от автомобильного транспорта. Рассмотрены новые инновационные образцы шин с имеющие минимальное воздействие на окружающую среду.

Abstract. The article provides an analytical review of the impact of car tires on the environment during their operation. The main ways to reduce the environmental impact on the environment from road transport are given. New innovative tire designs with minimal environmental impact are considered.

Ключевые слова: автомобильная шина, полигон, испытания, специальные дороги, искусственные неровности, комбинированные матшруты.

Keywords: car tires, landfills, tests, special roads, artificial bumps, combined mat routes.

© Сотников Д. А., Татаринцев В. Ю., Артёмов А. В., Школьных А. В., Прядкин В. И., 2026

Введение

Ведущие компании Европы по производству шин, такие как Michelin, Pirelli, так же располагают собственными полигонами.

За последние 10-20 лет построены новые полигоны и модернизировались уже существующие, крупные зарубежные шинные фирмы ввели в строй собственные полигоны с инновационным техническим обеспечением [4,8]. Полигонные испытания шин позволяют быстро исправлять выявленные дефекты, что позволяет оперативно управлять качеством продукции. Опыт показывает, что применение полигонных испытаний позволяет не менее чем на 1,5 года, ускорить весь процесс создания новых конструкций шин [1,2,3].

Большинство полигонов в Европе имеют комплекс дорог для оценки работоспособности шин и одновременно дороги для лабораторно-дорожных испытаний по оценке влияния шин на технические характеристики автомобиля [4]. При проведении испытаний на полигонах шины оцениваются по таким параметрам, как сцепление на различных поверхностях, комфортность хода, устойчивость к агрессивным нагрузкам и износу, а также поведение в экстренных ситуациях и при высоких температурах [1,5].

Помимо дорог на полигонах строятся здания для инженерно-технических работников, служб ремонта, технического обслуживания автомобилей, приборного обеспечения, дорожно- эксплуатационных служб, служб систем дождевальных установок, бензозаправочных станций, весовые и другие сооружения. Применяются системы автоматизированного управления испытаниями и обработки результатов. Площади, занимаемые полигонами, исчисляются сотнями и тысячами гектаров.

Шинная компания Michelin использует сеть специализированных полигонов по всему миру для тестирования шин в различных климатических условиях [6,7]. Ключевым европейским комплексом для летних и всесезонных тестов является полигон CEMA в Испании, отметивший 50-летие в 2023 год (рис. 1) [6].

Компания также использует сторонние площадки для специфических тестов, а развитие технологий шин происходит в собственных исследовательских центрах.

Испытательный полигон Michelin в испанской Альмерии - CEMA является одним из самых важных для компании комплексов, занимающихся разработкой и тестированием новых шин.

Шинная компания Michelin выбрала эту локацию из-за того, что это место является одним из самых сухих в Европе. Через более чем три десятилетия

Michelin обладает возможностью тестировать свои крупногабаритные шины на самых разных поверхностях от густой грязи до земли, покрытой острыми обломками скал, проверяя свои шины в буквальном смысле на пределе их возможностей. В общей сложности длина трассы равняется 100 км, на ней находятся автоматизированные тестовые «роботы», которые продумывают все новые маршруты, чтобы удостовериться в прочности шин. На полигоне используется самое современное и высокотехнологичное оборудование, а также самая новая и крупная техника [6,7].



Рисунок 1 – Полигон CEMA

Официальное открытие полигона состоялось 2 января 1973 года, и на первом этапе на полигоне тестировались шины для строительной и горнодобывающей отраслей. Тогда в CEMA работали 59 человек, у которых было шесть единиц техники и одна трасса для испытаний длиной 3,5 км. Со временем комплекс развивался, увеличивая парк техники и штат, и в конечном итоге стал эталонным центром тестирования шин. Уже через год после открытия началось строительство новых трасс для тестирования сельскохозяйственных шин, к которым в скором времени добавились треки для испытаний шин для грузовиков. В 1977 году была введена в эксплуатацию первая трасса для проведения тестов с использованием беспилотных автомобилей, а в 1980-е в комплексе начали проводить испытания легковых и авиационных шин.В 1982 году сотрудники CEMA освоили рентгеновский и ультразвуковой методы неразрушающего анализа, а в 1989-м началась «новая эра автоматизации» благодаря запуску в эксплуатацию оборудования собственной разработки. Начиная с 1992 года легковые и грузовые шины тестируются не только на трассах, но и на дорогах общего пользования. В конце 1990-х произошло несколько событий, которые «под-

черкнули важность CEMA для компании Michelin». В частности, на полигоне был представлен инновационный производственный процесс C3M (используется единый компактный модуль для вулканизации и сборки шины) и отпраздновано столетие Бибендума – символа Michelin. Тогда же с Профессиональной школой Альмерии было подписано соглашение о проведение летних стажировок учащихся. В начале 2000-х в CEMA начали тестировать сверхкрупногабаритные шины общим диаметром более четырех метров и весом 5,6 тонны для 63-дюймовых дисков Caterpillar 797, самого большого самосвала в мире. Еще одним важным технологическим достижением того десятилетия стал запуск в эксплуатацию высокопроизводительных симуляторов для разработки грузовых шин, а в 2015-м в центре начали использовать робот-манипулятор и сканирующий электронный микроскоп. В 2020 году на полигоне появилась новая техника для испытаний, такая как сельскохозяйственный каток S14 и самосвал Caterpillar 797F [6,8].

Одна из особенностей CEMA состоит в том, что полигон расположен в уникальном месте – природном парке Кабо-де-Гата-Нихар, обладающим богатым биологическим разнообразием. Статус природного парка был присвоен региону в 1987 году, и CEMA активно участвует в защите окружающей среды, в частности занимаясь реабилитацией и реинтродукцией охраняемых видов растений и животных, а особое внимание уделяется защите драконова дерева или драцены драконовой – одного из символов Канарских островов. Основные этапы развития полигона CEMA приведены в таблице.

Таблица – Важные этапы в развитии полигона CEMA

Дата начала работ	Ввод новых объектов и работ на полигоне
1973	Запуск в эксплуатацию полигона
1975	Открытие трасс для испытаний тракторных и легковых шин
1976	Первые тесты грузовых шин
1978	Первые испытания с применением беспилотных автомобилей
1982	Пуск в эксплуатацию рентгеновского и ультразвукового оборудования
1984	Участие в создании природного парка Кабо-де-Гата-Нихар
1988	Первые испытания авиационных шин
1992	Испытания «солнцемобиля» Spirit Of Biel/Bienne III
1999	Тесты с применением автомобилей, управляемых системой GPS, и подписание «декларации об общественных интересах»

Окончание таблицы

2000	Разработка шин для Caterpllar 797, самого большого самосвала в мире
2002	Получение сертификата AUDELCO (организации, специализирующейся на аудите и сертификации систем управления в области предотвращения профессиональных рисков)
2003	Проектирование, монтаж и ввод в эксплуатацию высокопроизводительных симуляторов для разработки грузовых шин
2005	Сертификация системы экологического менеджмента по стандарту ISO 14001
2012	Открытие справочного центра Michelin при WBCSD (Всемирный совет предпринимателей по устойчивому развитию)
2015	Ввод в эксплуатацию первого роботизированного манипулятора и сканирующего электронного микроскопа
2020	Новая техника - сельскохозяйственный каток S14 и самосвал Caterpillar 797F
2023	50-летний юбилей

Полигон CEMA расположен в Кабо-де-Гате, районе с особым микроклиматом и самым низким уровнем осадков в Европе (всего 200 мм в год). Комплекс занимает площадь в 4500 га (площадь треков и построек – более 60 000 м2) и включает в себя специализированные трассы с различными типами покрытия общей протяженностью более 100 км. Ежегодно на полигоне шины тестируются на 250 автомобилях, которые проезжают расстояние почти в 20 миллионов километров (рис. 2) [6,8].



Рисунок 2 – Трассы полигона СИМА

В CEMA работают более 170 специалистов, каждый день собирающих и обрабатывающих данные, полученные во время испытаний. В комплексе также

есть различные технические отделы, функции которых варьируются от разработки методологии и мониторинга проведения тестов до материального обеспечения испытаний, а также проектирования шин и настройки механического и электронного оборудования (рис.3).



Рисунок 3 – Тестирование сверхкрупногабаритных шин для самого большого самосвала в мире Caterpillar 797

На пути к созданию устойчивой мобильности Michelin постоянно повышает характеристики своих шин, не только адаптируясь к глубоким и непрерывным изменениям, которые претерпевает индустрия, но и выполняя обязательства компании, согласно которым к 2050 году все шины будут на 100% состоять из экологичных – переработанных или биологического происхождения – материалов, а к 2030 году их доля в объемах сырья уже должна достичь 40%, - отмечают в компании. – В рамках выполнения поставленных задача Michelin полагается на свои технологическое лидерство и способность создавать и внедрять инновации, и сейчас более чем 6000 экспертов занимаются разработкой самых высокотехнологичных шин в мире, а объем инвестиций в научные исследования превышает 680 млн евро в год. Комплекс CEMA, который в этом году отмечает свое 50-летие, является одним из самых важных для компании центров, занимающихся разработкой и тестированием новых продуктов».

Размер полигона настолько велик, что Michelin, которая сейчас испытывает там целый спектр грузовых и OTR-шин, отмечает, что неиспользуемого пространства осталось еще достаточно, чтобы построить несколько дополни-

тельных тестовых трасс, если в этом возникнет потребность. Журналистам предложили взглянуть, как функционирует внедорожная трасса, но при этом представители компании отмечали, что особое внимание уделяется тестированию шин, предназначенных для земляных и подъемно-погрузочных работ [9,10].

Объемы инвестиций, уже сделанных Michelin для развития полигона в Альмерии, говорят о том, насколько важен этот комплекс для компании, особенно, в нынешнем экономическом климате. Даже использование CAT 797 само по себе потребовало немалых вложений. Эта огромная махина потребляет до 7000 дизельного топлива в день, т.е. в год на топливо для нее уходит почти 3 миллиона евро, если брать цены на топливо в Британии. Преимущества тестов в реальных условиях даже сложно себе представить, а обладание такой уникальной испытательной площадкой уже само по себе может быть достаточной причиной. Это также является гарантией того, что компания будет и дальше успешно развивать инновационные технологии, которые помогут лучше закрепиться в этом стратегически важном сегменте рынка. К тому же производство шин для первичной комплектации укрепляет связи с автопроизводителями (рис.4).



Рисунок 4 –Тестовый полигон OTR-шин Michelin в Альмерии

В настоящее врем сегмент OTR-шин иметь рост, что объясняется повышенным спросом на крупногабаритные шины и на шины для машин строительно-дорожного комплекса, применяемых на земляных работах.

Приобретен компанией для обеспечения полного контроля над испытаниями зимних шин. Расположен за полярным кругом, что обеспечивает надежный снежный и ледяной покров для тестов.

Компания «Michelin» приобрела испытательный полигон «Лисью Ферму» в Ивалодля обеспечения полного контроля над испытаниями зимних шин. Расположен за полярным кругом, что обеспечивает надежный снежный и ледяной покров для тестов. Практически, 20 лет шинная компания «Michelin» арендовала «Лисью Ферму» для своих нужд, однако недавно приобрела ее в свое эксклюзивное пользование. Полигон «Лисья ферма» находится в 300 км к северу от Полярного круга, и с ноября по март температура там составляет от 0° до -30°; площадь полигона достигает 60 гектар, включая 20 гектар испытательных трасс, в том числе снежную трассу протяженностью 1,7 км, пять платформ для тестов на торможение и ускорение, две трассы для испытаний шин на льду, четыре кольцевые трассы для испытаний поперечного сцепления и один скат для тестов на разгон-ускорение. Тестирование проводят зимних легковых шины «Michelin», этих шин относится к линейке X Ice, специально разработанных для регионов с холодным климатом, таких, как страны Скандинавии и Россия (рис.5). Экспертов прельщает качество и объем снега, постоянные перепады температуры от 0° до экстремальных -30° [7,9].

Шинные тесты, на полигон «Лисья ферма», включают испытания на разгон, сцепление и торможение на снегу, тесты поведения шин на заснеженной поверхности, различные виды тестов на сцепление и производительность на снегу и льду, тесты на прохождения круга, а также на удаление камней из углублений протектора.



Рисунок 5 –Полигон «Лисья Ферма» в Финляндии

Каждая шина компании Michelin, сделанная на заводе и поступающая в продажу, обязательно проходит сложную и долгую процедуру сертификации. Эту сертификацию проводят аккредитованные испытательные центры в различных странах, имеющие свои лаборатории, массу разнообразных испытательных стендов, и даже гоночные трассы, дороги с различными типами покрытия и участками бездорожья. Для тестирования шин легковых автомобилей на скоростные качества в компанииMichelinразработан специальный автомобиль «Michelin PLR» [2,6]. Он представлял собой подвижную лабораторию, лимузин на базе спорткараCitroën DS. Он имел 5 осей, что позволяет одновременно испытывать 10 шин, из которых 6 располагались на задних мостах и 4 на передних. Michelin PLR весит, как крупный грузовик, чтобы на каждую покрышку приходилась стандартная нагрузка для легкового авто (рис. 6).



Рисунок 6 – Мобильная лаборатория базе спорткара Citroën DS

На автомобиль, устанавливают дополнительное оборудование повышенной точности для измерения скорости, углового ускорения, линейного ускорения, тормозного пути. Это только общий набор приборов. Отдельный комплект оборудования используется для измерения параметров в самой шине: температура воздуха внутри покрышки, температура на рабочей поверхности и на ободе, степень деформации (измеряется оптическими датчиками бесконтактно). Для испытаний используются машины с автоматическим регулированием давления в шинах. Это позволяет в экстремальных испытательных режимах, когда шина сильно нагреваются, не повышать допустимое давление воздуха в них. На испытаниях шины проверяют на заявленные характеристики и определяют

их запас прочности, что делается с соответствующими мерами безопасности для водителя.

В общей сложности в технологических центрах Мишлен ежегодно проводят 40 000 тестов, применяют порядка 700 различных методик измерений для испытания шин. Широкая география тестовых полигонов крайне важна для испытания шин в реальных условиях. Ведь воссоздать погодные катаклизмы возможно на небольших площадках, но этого недостаточно для испытания, например, коммерческих автомобилей в условиях реальной зимы. Именно поэтому Мишлен устраивает эксплуатационные тесты на дорогах общего пользования в странах с разным климатом. Испытания проводят на ускорение, торможение, тяговое усилие и поперечное сцепление во время дождя, снега и даже на горной местности с ограниченной видимостью. Только после тщательной проверки прототипа модель шины может быть запущена в массовое производство [6].

Компания Michelin постоянно повышает характеристики своих шин, не только адаптируясь к глубоким и непрерывным изменениям, которые претерпевает индустрия, но и выполняя обязательства компании, согласно которым к 2050 году все шины будут на 100% состоять из экологичных – переработанных или биологического происхождения – материалов, а к 2030 году их доля в объемах сырья уже должна достичь 40%, - отмечают в компании. – В рамках выполнения поставленных задача Michelin полагается на свои технологическое лидерство и способность создавать и внедрять инновации, и сейчас более чем 6000 экспертов занимаются разработкой самых высокотехнологичных шин в мире, а объем инвестиций в научные исследования превышает 680 млн евро в год. Комплекс CEMA является одним из самых важных для компании центров, занимающихся разработкой и тестированием новых продуктов [6,10].

Компании Pirelli имеет несколько официальных испытательных полигонов в разных частях мира для тестирования автомобильных шин. Зимний испытательный комплекс **Sottozero Centre к**компании **Pirelli** расположен в шведской Лапландии (г. Флюрхеден), который работает и в летнем режиме для проверки всесезонных и зимних шин на мокром и сухом асфальте. Второй крупнейший полигон **Circuito Panamericano расположен** в Южной Америке, расположенный в городе Элиас-Фаусту (штат Сан-Паулу). На площади 1,65 млн кв. м находятся 7 трасс общей протяженностью более 22 км.

Скорость, с какой новые автомобили выходят на рынок, означает, что увеличивается потребность в самых современных шинах, адаптированных к последним моделям авто. Поэтому компания полностью обновили свои линейки

Cinturato и Scorpion всего за два года, добавив в них по три новые модели всех трех сегментов – летнего, зимнего и всесезонного. Так же компания расширяет применение моделирования и технологий виртуальной реальности, физические тесты, позволяющие оценить характеристики шин, остаются основой философии Pirelli при разработке новой продукции, вследствие чего полигоны используются более интенсивно.

Помимо Sottozero Centre, компания также тестирует шины на полигоне в Виццола-Тичино неподалеку от Милана, где влияние шин на управляемость автомобилей оценивается уже более полувека.

Испытательный полигон Sottozero Centre расположен во Флурхедене, в 900 км к северу от Стокгольма, и занимает площадь в 120 га. Полигон был открыт в 2017 году, включает в себя в том числе треки с наклоном до 20 градусов, а для тестов на сухом и мокром покрытии были построены трассы длиной по 1 200 м, тогда как тормозные свойства шин в летних условиях будут оцениваться на 400-метровом прямом участке. Шведский полигон компании Pirelli подходит для испытаний шин всех типов автомобилей, в том числе новейших гибридов и электромобилей, а в список автопроизводителей, которые недавно использовали центр, входит, к примеру, хорватская Rimac, проводившая тесты зимних шин для своего электрического гиперкара Nevera.

Компания Pirelli завершила строительство крупнейшего в Южной Америке испытательного комплекса Circuito Panamericano для тестирования мотоциклетных и автомобильных шин, а также новых моделей транспортных средств. Новый полигон расположен в бразильском городе Элиас-Фаусту (штат Сан-Паулу) и имеет семь трасс с различными типами покрытия общей площадью 250 000 квадратных метров. Этот проект, основан на постоянном поиске самых передовых технологий в производстве шин с растущим использованием цифровизации производственных процессов и ориентации на сегмент шин с высокой добавленной стоимостью, а также на эволюции автомобильной промышленности и новых потребительских требованиях. Благодаря мультитрековой структуре комплекс Circuito Panamericano более универсален, чем старая гоночная трасса, и позволяет проводить большее количество более сложных тестов, а также оптимизирует время разработки новых моделей шин.

Заключение

Проведённый анализ показал, что современные европейские полигоны для испытания автомобильных шин представляют собой высокотехнологичные

научно-исследовательские комплексы, обеспечивающие всестороннюю оценку эксплуатационных, прочностных и экологических характеристик шин. Именно полигонные испытания позволяют моделировать реальные условия эксплуатации транспортных средств, включая движение по дорогам с различными типами покрытия, воздействие высоких и низких температур, интенсивные динамические нагрузки, а также экстремальные режимы торможения, ускорения и прохождения поворотов.

Важным элементом европейской испытательной базы является зимний полигон Michelin в Ивало (Финляндия), где обеспечиваются стабильные условия для проверки сцепных свойств шин на снегу и льду.

Перспективы развития испытательных полигонов связаны с дальнейшей цифровизацией процессов испытаний, внедрением технологий искусственного интеллекта для обработки больших массивов экспериментальных данных, расширением применения беспилотных транспортных средств и развитием экологически ориентированных методов оценки. В условиях перехода автомобильной промышленности к устойчивой мобильности именно испытательные полигоны становятся ключевым инструментом создания шин нового поколения, сочетающих высокий уровень безопасности, долговечности, энергоэффективности и минимального воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Вахламов В. К. Автомобили: эксплуатационные свойства: учебник. – М.: Академия, 2005. – 240 с.

2. Евзович В. Е., Райбман П. Г. Автомобильные шины, диски и ободья. – М.: Автополис-Плюс, 2010. – 144 с.

3. Бакфиш К., Хайнц Д. Новая книга о шинах. – М.: АСТ; Астрель, 2003. – 303 с.

4. Безверхий С. Ф., Яценко Н. Н. Основы технологии полигонных испытаний и сертификации автомобилей. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 600 с.

5. Гуслицер Р. Л. Шины и автомобиль. – М., 2007. – 283 с.

6. Michelin. The Michelin Experience Centre Almería (CEMA): 50 years contributing to tire innovation. – 2023.

7. Michelin Engineering & Services. CEMA Almería Testing Centre: техническое описание испытательных трасс и инфраструктуры.

8. Pacejka H. B. Tire and Vehicle Dynamics. – 3rd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 642 p.

9. ASTM International. ASTM F1806-21. Standard Practice for Tire Testing Operations: Basic Concepts and Terminology for Reference Tire Use. – West Conshohocken, PA: ASTM International.

10. Klyatis L. M. Trends in Development of Accelerated Testing for Automotive and Aerospace Engineering. – Academic Press, 2020. – 328 p.

References

1. Vakhlamov V. K. Cars: operational properties: textbook. – M.: Academy, 2005. – 240 p.

2. Evzovich V. E., Raibman P. G. Automobile tires, rims and rims. Moscow: Avtopolis–Plus, 2010. 144 p.

3. Bakfish K., Heinz D. A new book about tires. Moscow: AST; Astrel, 2003. 303 p.

4. Bezverkhy S. F., Yatsenko N. N. Fundamentals of technology for field testing and certification of cars. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1996. 600 p.

5. Guslitzer R. L. Tires and car, Moscow, 2007– 283 p.

6. Michelin. Michelin Almeria Expert Center (CEMA): has been contributing to the development of innovative tires for 50 years. – 2023.

7. Michelin-awarded engineering and services. International Test Center: technical description of the test equipment and installation.

8. Paseika H. B. Tires and vehicle dynamics. – 3rd ed. - Oxford: Butterworth–Heinemann, 2012. - 642 p.

9. ASTM International. ASTM F1806-21. Standard Tire Testing Practice: Basic concepts and terminology for use in reference tires. – West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International Standard.

10. Klyatis L. M. Trends in the development of accelerated testing for automotive and aerospace technology. – Academic Press, 2020. – 328 p.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_111-124
УДК 629.114.2.07

Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Мураткин С.Е.
преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Артёмов А.В.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Школьных А.В.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Muratkin S.E.
lecturer at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Artemov A.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Shkolnykh A.V.
assistant at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doktor of technical sciences, professor, department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АДАПТАЦИИ КОЛЁСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ДЛЯ ЛЕСНЫХ МАШИН

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ADAPTATION SYSTEM FOR A WHEELED ENGINE FOR FOREST MACHINES

Аннотация. В статье рассматривается повышение адаптивности колёсных движителей лесных машин путём применения системы автоматического регулирования давления сжатого воздуха в шинах сверхнизкого давления, что в свою очередь позволяет создать интеллектуальную систему адаптации колёсного движителя (ИСАКД). Данная система позволяет в реальном времени отслеживать параметры опорного основания и колёсного движителя, тем самым подбирая оптимальные параметры движителя во время выполнения машинами лесных работ.

Abstract. The article discusses increasing the adaptability of wheeled propellers of forest vehicles by using an automatic compressed air pressure control system in ultra-low pressure tires, which in turn makes it possible to create an intelligent wheel propulsion adaptation system (ISACD). This system allows you to monitor the parameters of the support base and the wheel drive in real time, thereby selecting the optimal parameters of the drive during the performance of forestry work by machines.

© Татаринцев В. Ю., Мураткин С. Е., Артёмов А. В., Школьных А. В., Прядкин В. И., 2026

Ключевые слова: шина сверхнизкого давления, Шаина-2, адаптивный колёсный движитель, лесные машины, интеллектуальные системы, АКД, бездорожье, испытания, нагрузочная характеристика, радиальная деформация, давление.

Keywords: ultra-low-pressure tire, Shaina-2, adaptive wheel drive, forest machines, intelligent systems, AKD, off-road, testing, load characteristic, radial deformation, pressure.

Введение

Во время выполнения сельскохозяйственных работ, мобильным энергетическим средствам (МЭС) необходимо развивать достаточное тяговое усилие и обеспечивать хорошее сцепление с опорной поверхностью. В настоящее время самым актуальным способом повышения тягово-сцепных свойств МЭС является применение автоматической системы регулирования давления воздуха в шинах (АСРДВШ) [1-5].

Так использование АСРДВШ позволяет создать адаптивный колёсный движитель (АКД). АКД – это тип движителя, который способен изменять свои параметры в реальном времени в зависимости от условий окружающей среды и выполнения требуемых задач. Такие движители могут включать в себя механизмы и устройства, позволяющие управлять жёсткостью колёс, размерами угла наклона и изменениями ширины пятна контакта шины или другими её параметрами, что позволяет им адаптироваться к различным типам поверхностей, рельефу и условиям эксплуатации.



а *б*

а – общий вид системы; *б* – внешний подвод сжатого воздуха к шине

Рисунок 1 – Трактор компании John Deere серии 8R, оснащённый заводской автоматической системой регулирования давления в шинах

Применение АКД в конструкциях МЭС позволяет повысить тягово-сцепные свойства, проходимость и манёвренность, а также уменьшить износ шин и расход топлива [6-10].

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение адаптивности колёсных движителей лесных машин путём применения системы автоматического регулирования давления воздуха в шинах сверхнизкого давления.

Задачи исследования:

1) Разработка интеллектуальной системы адаптации колёсного движителя для лесных машин;

2) Разработка математической модели работы адаптивной системы регулирования давления воздуха в шинах и режимы движения адаптивного колёсного движителя;

3) Проведение экспериментальных исследований, направленных на определение упругих характеристик шин, а также проверку разработанной математической модели.

Объект исследования

Объектом исследования является пневматическая тонкостенная шина сверхнизкого давления диагональной конструкции размерностью 900х500-16 модели ШАИНА-2 производства компании «Арктиктранс» в бескамерном исполнении, имеет 2 слоя резинокорда и протектор с рисунком повышенной проходимости, высотой 9 мм (рис. 2). Предназначена для легких вездеходных транспортных средств, эксплуатируемых вне дорог и на грунтах с малой несущей способностью (заболоченной местности, песчаном неуплотненном грунте, снежном покрове, льду и вспаханном поле). Комплектуется диском с двухсторонним бэдлоком, также может быть укомплектована камерой.

Предметом исследования являются закономерности изменения тягово-сцепных свойств и режимы адаптивности колёсных движителей от различных параметров шин.

В качестве измеряемых параметров, определяющих выходные параметры ШСНД выбраны наиболее значимые показатели взаимодействия шины с опорным основанием [11-14].



а *б*

а – общий вид шины ШАИНА-2; *б* – шина ШАИНА-2 во время испытаний

Рисунок 2 – Объект исследований шина ШАИНА-2

Основные технические характеристики шины ШАИНА-2 приведены в таблице.

Таблица – Технические характеристики шины сверхнизкого давления ШАИНА-2

Наименование показателя	ТУ 700016217 -2012
Обозначение шины	14-16
Обозначение модели шины	ШАИНА-2
Тип рисунка протектора	Повышенной проходимости Специальный
Высота грунтозацепа, мм	9
Норма слойности	2
Исполнение	Бескамерное
Индекс нагрузки	90
Индекс скорости	В
Размеры новой шины, мм:	
- наружный диаметр	900
- ширина профиля, не более	500
- статический радиус	406
Нормы эксплуатационных режимов:	
- максимально допускаемая нагрузка на шину, кг	600
- внутреннее давление, соответствующее максимальной допускаемой нагрузке на шину, кПа	80
- минимально допускаемое давление, кПа	20
- нагрузка на шину, соответствующая минимальному допускаемому давлению в шине, кг	400
Максимальная скорость, км/ч	50
Масса шины, кг, не более	24
Объём шины, $м^3$	0,4
Водоизмещение, $м^3$	0,22

Материалы и методы исследования

Для оценки эффективности автоматической системы регулирования давления воздуха в шине разработана математическая программа движения колеса по опорной поверхности с заданными несущими свойствами [15-22].

Для того, чтобы модель обладала высоким пространственным разрешением, моделируемые шина и почва состоят из большого количества элементов – около 25000 (рис. 3).

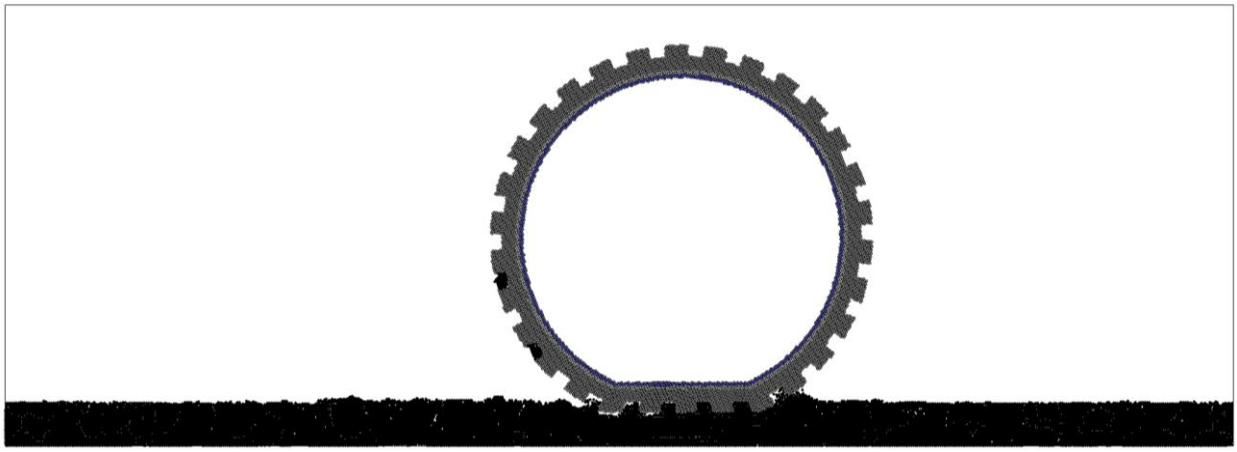


Рисунок 3 – Представление в модели шины сверхнизкого давления и почвы

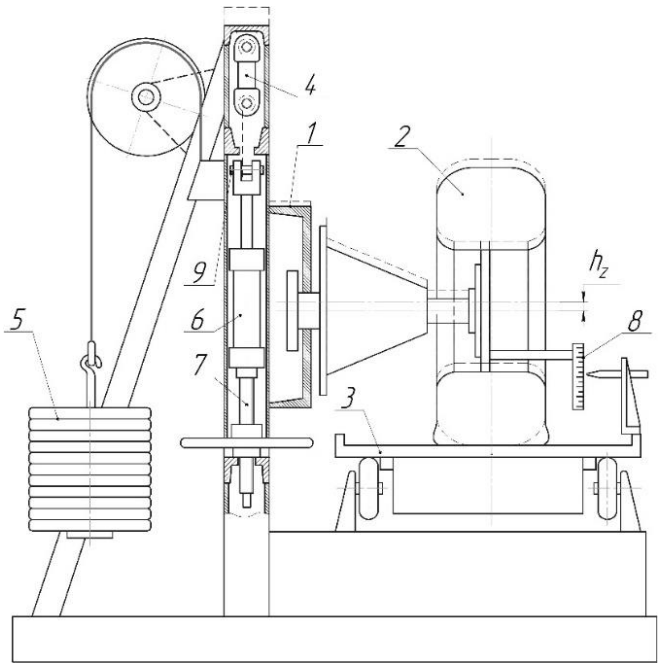
Элементы имеют возможность двигаться в процессе движения колеса по опорной поверхности по законам классической механики, что приводит к изменению формы и фрагментации почвенного слоя.

Моделирование производится в двухмерном декартовом пространстве *X*–*Z*. Состояние каждого элемента круговой формы E_i задается четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, z_i) и двумя составляющими скорости (v_{xi}, v_{zi}). Механическое взаимодействие элементов между собой принято вязкоупругим, что позволяет учитывать основные механические свойства почвы и шины – модуль упругости, коэффициент внутреннего трения.

Лабораторные испытания шины проводились на универсальном стенде СИХШ 2500-1000. В процессе испытаний проводится радиальная обжимка, определяются массово-геометрические показатели, снимаются отпечатки пло-

щадей контакта шин, измеряются удельные давления и экологические показатели [15-20].

Нагрузочная характеристика шин (рис. 4) снималась на стенде СИХШ 2500-1000 двумя способами. При первом способе устанавливалось заданное давление воздуха и на этом давлении снималась зависимость между нагрузкой и радиальной деформацией. Далее опыты повторялись при различных давлениях воздуха. По второму способу на каждом из установленных давлений воздуха снимались циклы «нагрузка-разгрузка», по полученным значениям строились петли гистерезиса.



1 – подвижная каретка; *2* – испытуемая шина; *3* – стол стенда; *4* – тензозвено радиальной нагрузки; *5* – груз на противовесе; *6* – гидроцилиндр нагрузки; *7* – винт; *8* – измерительная линейка; *9* – палец фиксирующий

Рисунок 4 – Конструктивно-принципиальная схема определения нагрузочной характеристики шины

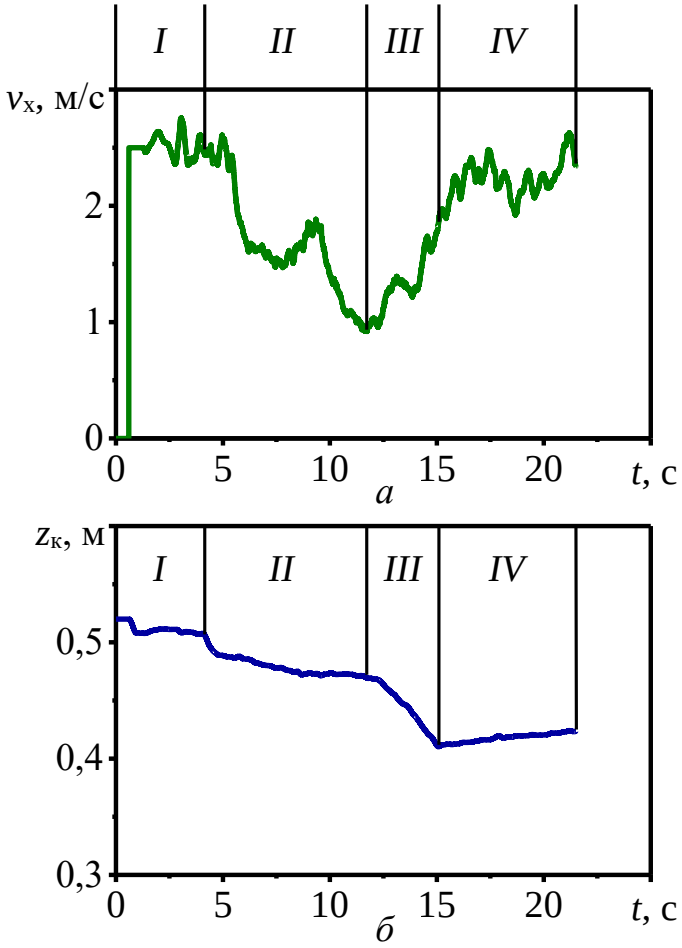
Крутильная жесткость шины на нормированных значениях нагрузки и давлениях воздуха определялась по зависимостям угла закрутки от прилагаемого крутящего момента на стенде СИХШ 2500-1000 с использованием подвижной платформы.

Крутильная жесткость определялась в комплексе с тангенциальной жесткостью шины. Шина нагружалась подвижной кареткой стенда СИХШ 2500-

1000 весовой нагрузкой при различных давлениях воздуха. При этом фиксировалась радиальная деформация.

Результаты и обсуждение

В результате моделирования получили зависимости от времени t скорости движения оси колеса v_x (*а*) и вертикальной координаты оси колеса $z_к$ (*б*) на различных типах опорной поверхности (рис. 5).



I – движение колеса по твердой грунтовой дороге; *II* – движение колеса по почве с высокой влажностью; *III* – снижение давления в шине по линейному закону; *IV* – движение шины со сниженным давлением по почве с высокой влажностью

Рисунок 5 – Зависимость от времени t скорости движения оси колеса v_x (*а*) и вертикальной координаты оси колеса $z_к$ (*б*)

На графиках видно, что от типа опорной поверхности изменяется время и скорость движения колеса (идёт процесс адаптации колёсного движителя к условиям эксплуатации).

Все полученные результаты модели позволили воспроизвести моделирование процесса работы адаптивного колёсного движителя на различных этапах движения (рис. 6).

На рисунке 6 видно взаимодействие колеса с различными типами опорного основания и представлен процесс движения адаптивного колёсного движителя с указанием времени адаптации.

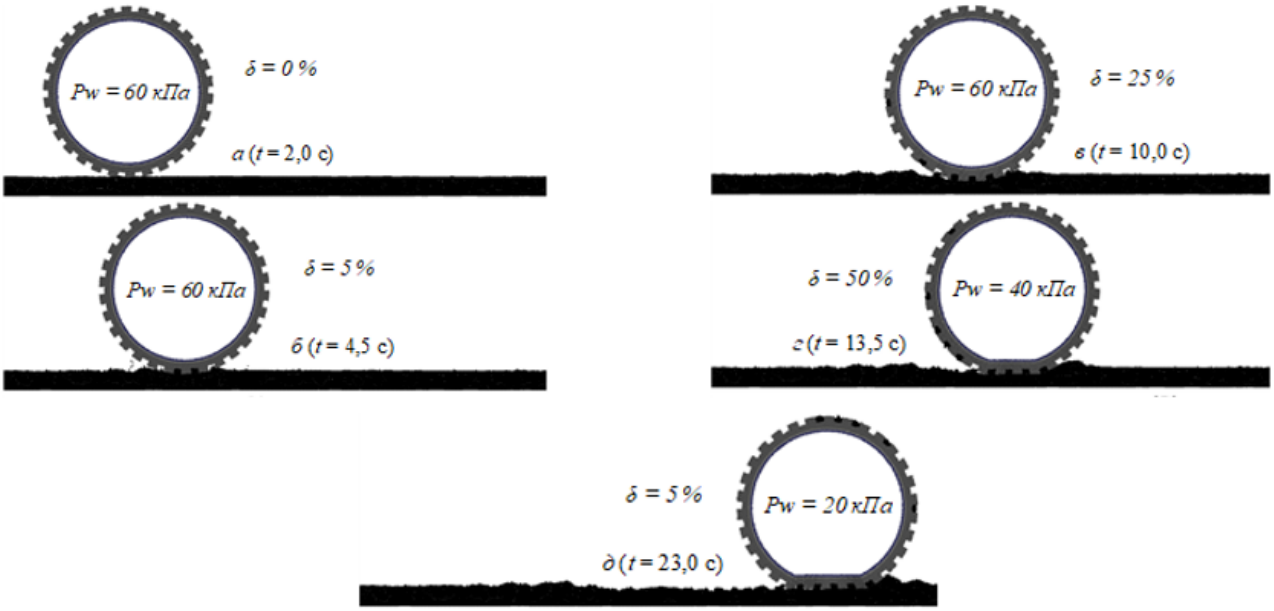


Рисунок 6 – Характер взаимодействия шины с опорной поверхностью на различных этапах движения

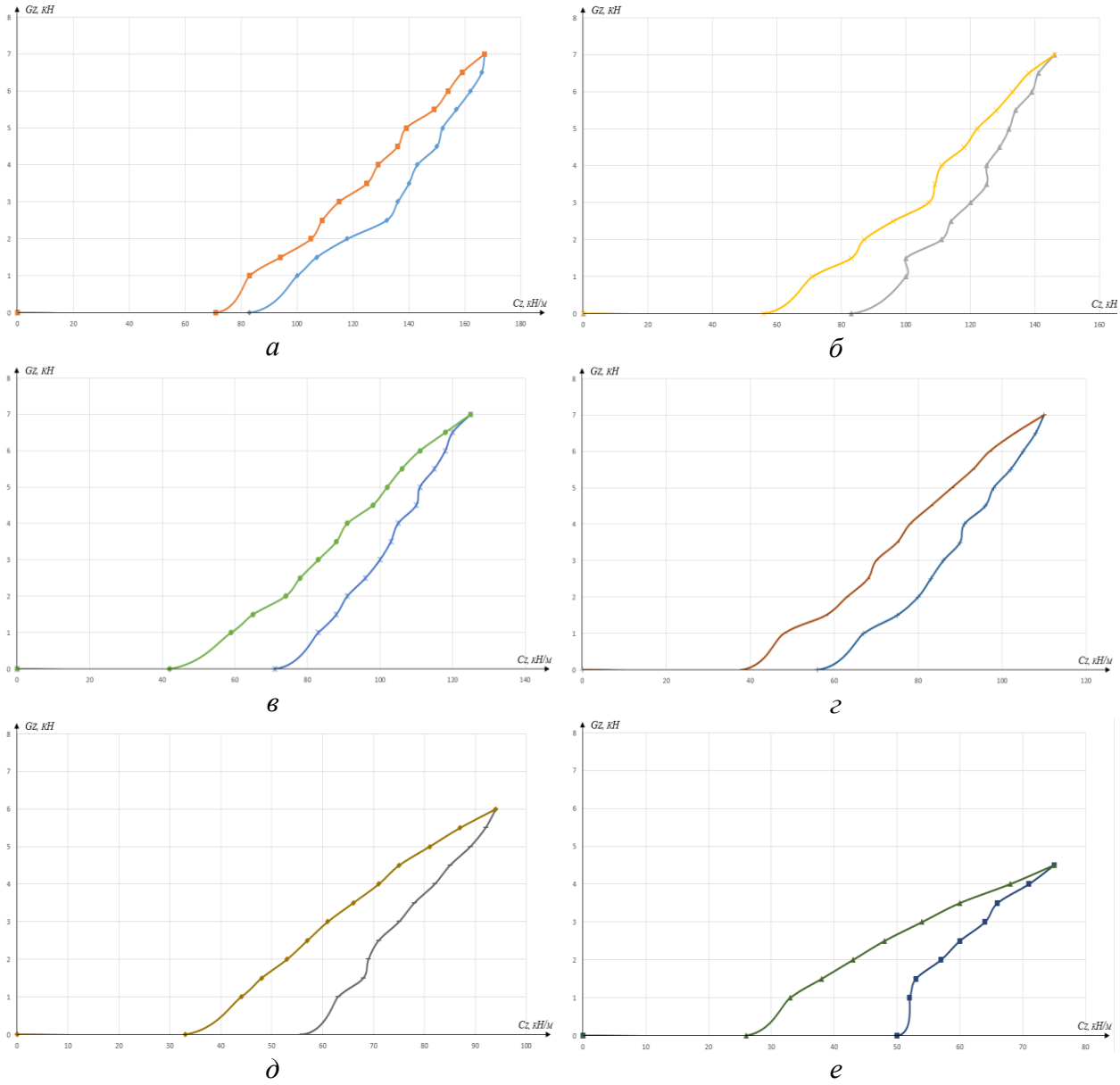
Предельно допустимая нагрузка на шину составила 700 килограмм при диапазоне давлений от 10 до 80 кПа. Упругая характеристика пневматической шины в данном случае имеет линейную зависимость в пределах деформации от h_z = 6 до h_z = 60 мм, заметная нелинейность упругой характеристики шины наблюдается в пределах от h_z = 0 до h_z = 6 мм и от h_z = 60 до h_z = 65 мм.

На рисунке 7 представлена зависимость жёсткости шины от нагрузки.

После получения параметров деформации шины, согласно ГОСТ 17697-72, определялась радиальная жесткость по формуле:

$$C_z = \frac{\Delta G_z}{\Delta h_z}, \text{ кН/м}$$

где ΔG_z – приращение нормальной нагрузки на шину, кН, Δh_z – приращение радиальной деформации шины, м.

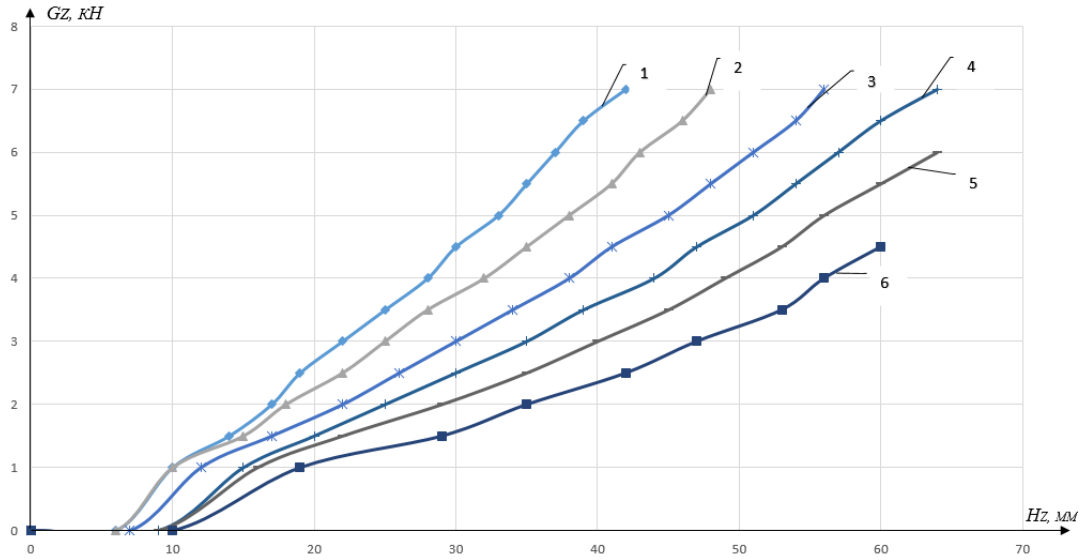


а – давление в шине 80 кПа; *б* – давление в шине 60 кПа; *в* – давление в шине 40 кПа; *г* – давление в шине 30 кПа; *д* – давление в шине 20 кПа; *е* – давление в шине 10 кПа

Рисунок 7 – Жёсткость шины ШАИНА-2 (зависимость жёсткости шины от нагрузки)

Результаты определения нагрузочной характеристики исследуемой шины приведены на рисунке 8. Рабочий диапазон относительных деформаций для шины ШАИНА-2 составляет от 32 до 555 мм на твердом опорном основании согласно рекомендациям завода-изготовителя, что соответствует диапазону относительных

деформаций в пределах $12 \le h_z \le 20,3\%$. Таким образом при полной нагрузке диапазон рабочих давлений находится в пределах 50-70 кПа, а при частичной нагрузке 20-40 кПа



1 – давление в шине 80 кПа; *2* – давление в шине 60 кПа; *3* – давление в шине 40 кПа; *4* – давление в шине 30 кПа; *5* – давление в шине 20 кПа; *6* – давление в шине 10 кПа

Рисунок 8 – Нагрузочная характеристика шины ШАИНА-2

При этом отмечается, что для кратковременного режима работы при преодолении труднопроходимых участков с повышенной влажностью допускается уменьшение давления воздуха в шине ниже рекомендованных [20-22].

Выводы

1. Повышения тягово-сцепных свойств МЭС на различных типах опорных поверхностей является актуальной задачей исследования, так как от этих свойств зависит производительность и эффективность работы МЭС. В настоящее время целесообразным является применение АСРДВШ в конструкциях МЭС. Автоматизация в процессе проектирования МЭС, а также использование ИИ позволяет подобрать оптимальные параметры работы адаптивного колёсного движителя и приспособиться к различным режимам эксплуатации в реальном времени. Оптимальное давление воздуха в шине позволяет снизить буксование, снизить повреждение и уплотнение почвы, повысить топливную эконо-

мичность, рабочую скорость движения и как следствие производительность агрегата.

2. Разработана математическая модель движения адаптивного колёсного движителя по различным типам опорной поверхности, оснащённого системой автоматического регулирования давления воздуха в шинах. Разработана компьютерная программа, реализующая предлагаемый математический аппарат, и позволяющая исследовать характер взаимодействия шины с опорной поверхностью на различных этапах движения. Разработанные математический аппарат и компьютерная программа позволяют изучить влияние основных параметров адаптивного колёсного движителя на повышение тягово-сцепных свойств мобильного средства.

3. Для уточнения параметров математической модели, а также для проверки ее адекватности проведены экспериментальные исследования физической модели адаптивного колёсного движителя мобильного средства. Относительное отклонение результатов, полученных теоретических и экспериментальных зависимостей не превышает 10 %.

Список литературы

1. Гуськов В. В., Бойков В. П., Поварехо А. С., Павлова В. В., Лысанович П. В. Проблемы автоматического регулирования давления в шинах мобильных машин // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сборник научных статей. – Минск : БНТУ, 2020. – Вып. 2. – С. 16-31.

2. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств : учебник для вузов. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

3. Усиков В. Ю., Келлер А. В., Ушнурцев С. В., Яковлев А. С. Техническое решение повышения эффективности децентрализованной системы регулирования давления воздуха в шинах // Наука и военная безопасность. – 2020. – № 1(20). – С. 67-73.

4. Тогизбаева Б. Б., Топильский Р. А. Повышение проходимости автомобилей за счет регулирования давления воздуха в шинах // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : материалы XI Международной научно-практической конференции (Астана, 16 марта 2023 года). – Астана : ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2023. – С. 323-325.

5. Татаринцев В. Ю., Мураткин С. Е., Артемов А. В., Прядкин В. И. Повышение тягово-сцепных качеств минитрактора путем применения автоматической подкачки шин // Повышение эксплуатационных качеств мобильных транспортно-технологических средств : материалы Всероссийской научной конференции, Воронеж, 15 ноября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 78-91. – DOI 10.58168/IPMTTM2023_78-91. – EDN BRZHQP.

6. Ким Ю. А., Бобрович В. А., Войтеховский Б. В., Исаченков В. С. Влияние величины давления воздуха в шинах колес на геометрические параметры пятна контакта при взаимодействии с опорной поверхностью // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 2(210). – С. 308-312.

7. Прядкин В. И. Воздействие экологичной шины на почву // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 198-200.

8. Прядкин В. И. Несущая способность высокоэластичной шины // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 48-50.

9. Прядкин В. И., Артемов А. В., Колядин П. А., Татаринцев В. Ю., Снятков Е. В. Шины сверхнизкого давления: проблемы их испытаний // Перспективные направления развития автомобильной отрасли и подготовка кадров : материалы Всероссийской научной конференции (Воронеж, 16 октября 2024 года). – Воронеж : ВГЛТУ, 2024. – С. 121-133.

10. Татаринцев В. Ю., Артемов А. В., Прядкин В. И. Повышение автоматизации адаптивных колёсных движителей // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – № 15. – С. 162-165.

11. Упругие характеристики шины сверхнизкого давления. Вертикальные нагрузки / С. В. Гончаренко, З. А. Годжаев, А. В. Артемов [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 8. – С. 18-21. – EDN QBLHSD.

12. Барахтанов Л. В., Котляренко В. И., Манянин С. Е., Соколов И. А. Исследование базовых характеристик шин сверхнизкого давления // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 2(95). – С. 172-178.

13. Григорьев Ю. Н., Вшивков В. А., Федорук М. П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.

14. Кривцов А. М., Кривцова Н. В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 254-276.

15. Прядкин В. И., Шавырин К. А., Кольцов А. Ю. Моделирование воздействия широкопрофильных шин грузовых автомобилей на дорожное покрытие // Инновационные технологии на автомобильном транспорте : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 18 мая 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 34-37. – DOI 10.34220/ITRT2021_34-37. – EDN TMFZPE.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025688041 Российская Федерация. Программа для моделирования воздействия шины сверхнизкого давления мобильного транспортного средства на деформируемую почву: заявл. 06.10.2025 : опубл. 16.10.2025 / В. И. Прядкин, В. Ю. Татаринцев, А. В. Артемов, В. В. Посметьев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – EDN QODIAB.

17. Прядкин В. И. Проходимость колесных транспортно-технологических агрегатов лесного комплекса : монография. – Воронеж : ВГАСА, 2000. – 232 с.

18. Прядкин, В. И. Мобильные энергосредства сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления : специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Прядкин Владимир Ильич; Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва. — Москва, 2013. — 34 с.

19. Единая методика испытаний и оценки шин тяговых машин в лабораторных и полевых условиях. Отчет НПО НАТИ, Арх. № 23517. - М., 1981. - С-49.

20. Годжаев З. А., Прядкин В. И., Артемов А. В. Моделирование движения мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2024. – Т. 18, № 3. – С. 31-38. – DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-3-31-38. – EDN PMEWSE.

21. Татаринцев В. Ю., Артемов А. В., Снятков Е. В., Прядкин В. И. Повышение адаптивности колёсных движителей на мобильных средствах: проблемы и пути решения // Перспективные направления развития автомобильной отрасли и подготовка кадров : материалы Всероссийской научной конференции, Воронеж, 16 октября 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 150-160. – DOI 10.58168/AuInPT2024_150-160. – EDN PTJJTN.

22. Левшин А. Г., Гаспарян И. Н., Алсанкари А., Бутузов А. Е. Методика экспресс-анализа буксования на эксплуатационных режимах работы трактора // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 32-36. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36. – EDN OQPFJA.

References

1. Guskov V. V., Boykov V. P., Povarekho A. S., Pavlova V. V., Lysanovich P. V. Problems of automatic pressure control in tires of mobile machines / Problems of automatic tire pressure control in mobile cars // Transport and transport systems: design, operation, technologies: collection of scientific articles. – Minsk: BNTU, 2020. – Issue 2. – Pp. 16–31.

2. Litvinov A.S., Farobin Ya.E. Automobile: Theory of Operational Properties: a textbook for universities. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 240 p.

3. Usikov V.Yu., Keller A.V., Ushnurtsev S.V., Yakovlev A.S. Technical solution to improve the efficiency of a decentralized tire air pressure control system // Science and Military Security. – 2020. – No. 1(20). – Pp. 67–73.

4. Togizbaeva B.B., Topilsky R.A. Improving the cross-country capability of vehicles by regulating the air pressure in tires // Current Problems of Transport and Energy: Ways to Find Innovative Solutions: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference (Astana, March 16, 2023). – Astana: L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2023. – Pp. 323–325.

5. Improving the traction and coupling qualities of a mini-tractor through the use of automatic tire inflation / V. Yu. Tatarintsev, S. E. Muratkin, A. V. Artemov, V. I. Pryadkin // Improving the operational qualities of mobile transport and technological equipment: materials of the All-Russian scientific conference, Voronezh, November 15, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – Pp. 78–91. – DOI 10.58168/IPMTTM2023_78-91. – EDN BRZHQP.

6. Kim Yu.A., Bobrovich V.A., Voitsekhovsky B.V., Isachenkov V.S. The influence of the air pressure in wheel tires on the geometric parameters of the contact patch during interaction with the supporting surface // Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Environmental Management, and Renewable Resource Processing. – 2018. – No. 2(210). – Pp. 308-312.

7. Pryadkin V.I. The Impact of an Eco-Friendly Tire on Soil // Bulletin of Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7, No. 3. – Pp. 198–200.

8. Pryadkin V.I. Load-bearing capacity of a highly elastic tire // Bulletin of Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7, No. 4. – Pp. 48–50.

9. Pryadkin V.I., Artemov A.V., Kolyadin P.A., Tatarintsev V.Yu., Snyatkov E.V. Ultra-low-pressure tires: problems in their testing // Promising directions for the development of the automotive industry and personnel training: materials of the All-Russian scientific conference (Voronezh, October 16, 2024). – Voronezh: VGLTU, 2024. – Pp. 121–133.

10. Tatarintsev V.Yu., Artemov A.V., Pryadkin V.I. Improving the automation of adaptive wheeled propulsion systems // Mechatronics, automation and robotics. – 2025. – No. 15. – Pp. 162–165.

11. Elastic characteristics of ultra-low-pressure tires. Vertical loads / S. V. Goncharenko, Z. A. Godjaev, A. V. Artemov [et al.] // Automotive Industry. – 2020. – No. 8. – Pp. 18-21. – EDN QBLHSD.

12. Barakhtanov L.V., Kotlyarenko V.I., Manyanin S.E., Sokolov I.A. Study of the basic characteristics of ultra-low-pressure tires // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. – 2012. – No. 2(95). – Pp. 172-178.

13. Grigoriev Yu.N., Vshchikov V.A., Fedoruk M.P. Numerical modeling using particle-in-cell methods. – Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. – 360 p.

14. Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. The particle method and its use in deformable solid mechanics // Far Eastern Mathematical Journal FEB RAS, 2002, vol. 3, No. 2, pp. 254-276.

15. Pryadkin, V. I. Modeling the impact of wide–profile truck tires on the road surfaceV. I. Pryadkin, K. A. Shavyrin, A. Y. Koltsov // Innovative technologies in automobile transport : Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, May 18, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – Pp. 34–37. – DOI 10.34220/ITRT2021_34-37. – EDN TMFZPE.

16. Certificate of state registration of a computer program No. 2025688041, Russian Federation. A program for modeling the impact of an ultra-low-pressure tire of a mobile vehicle on deformable soil: application filed on 06.10.2025; publication date: 16.10.2025 / V. I. Pryadkin, V. Yu. Tatarintsev, A. V. Artemov, V. V. Posmetyev; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov”. – EDN QODIAB.

17. Pryadkin V.I. Cross-country capability of wheeled transport and technological units of the forestry complex: monograph. – Voronezh: VGASA, 2000. – 232 p.

18. Pryadkin, V. I. Mobile agricultural power vehicles with ultra-low-pressure tires: specialty 05.20.01 “Technologies and means of agricultural mechanization”: abstract of the dissertation … of Doctor of Technical Sciences / Vladimir Ilyich Pryadkin; All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization. — Moscow, 2013. — 34 p.

19. Unified methodology for testing and evaluating tires of traction machines in laboratory and field conditions. Report of NPO NATI, Arch. No. 23517, Moscow, 1981, p. 49.

20. Godjaev, Z. A. Modeling the movement of a mobile energy vehicle with ultra-low-pressure tires / Z. A. Godjaev, V. I. Pryadkin, A. V. Artemov // Agricultural Machinery and Technologies. – 2024. – Vol. 18, No. 3. – Pp. 31–38. – DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-3-31-38. – EDN PMEWSE.

21. Improving the adaptability of wheeled propulsion systems on mobile vehicles: problems and solutions / V. Yu. Tatarintsev, A. V. Artemov, E. V. Snyatkov, V. I. Pryadkin // Promising directions for the development of the automotive industry and personnel training: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Voronezh, October 16, 2024. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2024. – Pp. 150–160. – DOI 10.58168/AuInPT2024_150-160. – EDN PTJJTN.

22. Methodology for rapid analysis of slippage under operating conditions of a tractor / A. G. Levshin, I. N. Gasparyan, A. Alsankari, A. E. Butuzov // Agroengineering. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – Pp. 32–36. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-4-32-36. – EDN OQPFJA.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_125-130
УДК 656.13:338.47

Федорин Ф.Д.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Карпов А.А.
студент Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Fedorin F.D.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Karpov A.A.
student of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

МЕТРОБУС – НОВЫЙ ВИД ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА: ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ

METROBUS – A NEW TYPE OF URBAN TRANSPORT: PROBLEMS, SOLUTIONS

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению системы городского транспорта BRT (метробус). В статье приведено краткое описание системы, рассмотрены ее преимущества и недостатки, а также намечены основные пути развития городского транспорта в городах России. В заключении дается краткий вывод о назначении метробуса, а также его применения в развивающихся городах.

Abstract. The article is devoted to the consideration of the BRT (metrobus) urban transport system. The article provides a brief description of the system, discusses its advantages and disadvantages, and outlines the main ways to develop urban transport in Russian cities. In conclusion, a brief conclusion is given about the purpose of the metrobus, as well as its use in developing cities.

Ключевые слова: городской транспорт, метробус, BRT (BusRapidTransit).
Keywords: urban transport, metrobus, BRT (BusRapidTransit).

Введение

Городская транспортная система играет важнейшую роль в развитии и совершенствовании современных городов. В настоящее время в России наблюдается уверенный рост автомобилизации населения, что неизменно приводит к перегруженности центральных улиц городов, многочисленным заторам и снижению скорости перемещения транспорта. Чтобы нормализовать нагрузку на транспортную сеть города, власти всех регионов активно развивают общественный транспорт.

© Федорин Ф. Д., Карпов А. А., Прядкин В. И., 2026

В населенных пунктах населением от 650 тыс. до 1,3 млн. жителей городской транспорт имеет ряд особенностей. Основной особенностью является сложная транспортная сеть, которая максимально загружена в центре города, и более разрежена на окраине. Для того чтобы справится с большим пассажиропотоком, важно создавать единую систему взаимодействия всех видов городского транспорта, которая будет работать как слаженный единый механизм.

Для обеспечения функционирования городов используется различный городской транспорт: автобус, троллейбус и трамвай. Метрополитен, несмотря на способность справляться с большим пассажиропотоком, из-за дороговизны строительства, есть только в 7 из 16 городов – миллионников. Однако с ростом промышленности и потребности в подготовке кадров, население этих населенных пунктов непрерывно растет. Бюджет городов не позволяет построить в них метро, однако острая необходимость в модернизации городской транспортной сети требует незамедлительного решения данной проблемы.

Решением, сочетающим в себе относительную дешевизну в постройке и высокую эффективность, является система BRT (от англ. BusRapidTransit – система скоростного автобусного сообщения), называемая в России «Метробус». Это современная транспортная система, превосходящая по транспортным характеристикам классическое автобусное сообщение, но имеющая меньшую себестоимость по сравнению с метрополитеном или легкорельсовым транспортом (ЛРТ). Так же она позволяет решать проблемы городского транспорта в условиях плотной застройки городских улиц.

Метробус как вид транспорта

Принцип данной системы заключается в физическом разделении транспортных потоков (рис.1). Подвижной состав движется по линиям, изолированным от остального транспорта с помощью отбойников или делинеаторов (рис.2), благодаря чему, получается добиться большей скорости сообщения.

На перекрестках метробусу предоставляется приоритетный проезд, что так же позволяет ускорить передвижение. Подвижным составом метробуса являются автобусы средней и большой вместимости [1]. Его перегоны длиннее, чем у автобусного транспорта. Станции оборудованы таким образом, чтобы поток пассажиров не задерживал движение: на платформе предусмотрено разделение потоков входящих и выходящих пассажиров. Платформа совпадает по высоте с полом низкопольных автобусов, для удобства и ускорения посадки и высадки. Вход на платформу осуществляется через турникет, а оплата проезда

производится в билетной кассе, что увеличивает пропускную способность, позволяя пассажирам не отвлекаться на это во время посадки и движения автобуса.



Рисунок 1 – Линия метробуса

Данный вид городского транспорта отделен от прочих участников дорожного движения, что практически исключает риск ДТП. Это делает метробус более безопасным, чем классический автобус. Так же, даже если подвижной состав метробуса это преимущественно автобусы с ДВС, он является более экологичным по сравнению с автобусным транспортом, так как не имеет задержек на светофорах и заторах, что значительно ускоряет время движения.



Рисунок 2 – Делинеаторы на улице г. Воронежа

Разберем основные достоинства и недостатки системы. К достоинствам можно отнести:

1. Экономическая доступность. Реализация проекта требует значительно меньших затрат, относительно метрополитена или ЛРТ. В статье Гидозарова М.А. «Метробус как элемент транспортной системы: анализ эффективности и перспектив внедрения в российских городах» приводится сравнение бюджетов постройки линий метробуса и метрополитена. Для строительства 74,5км линии метробуса в г. Воронеж требуется около 17 млрд. рублей, в то время как стоимость 1 км пути метро в Москве составляет 4,5-7млрд. рублей [2]. Так же затраты на содержание подвижного состава в период эксплуатации ниже, чем на рельсовом транспорте, а время ввода в эксплуатацию составляет всего 2-3 года.

2. Высокая эффективность. Благодаря обособленности движения, метробус может перемещать до 35 тыс. пассажиров в час, что значительно превосходит автобусный транспорт [2].

3. Гибкость. Метробус позволяет прокладывать новые маршруты и менять схемы движения без больших затрат. Так же система «Метробус» относительно легко интегрируется в схему движения городов, так как может быть реализована различными способами.

Недостатки:

1. Предельная вместимость. Несмотря на использование в системе автобусов большой вместимости (до 250 чел.), метробус уступает трамваям (до 500 чел.) и метро (1000-1500 чел.), что в условиях пассажиропотока больших городов может быть недостаточным.

2. Срок службы. Подвижной состав метробуса в среднем эксплуатируется 3 года, что в наше время является недостаточно высоким показателем. Так же срок службы всей дороги составляет около 25 лет, а ремонтдорожного покрытия должен производится раз в 5 лет, что так же вызывает неудобства при эксплуатации.

3. Инфраструктурные сложности. Несмотря на гибкость системы относительно рельсового транспорта, все же применение метробуса требует модернизации транспортной сети города. Это может быть осложнено плотной застройкой, особенностями рельефа и недостатком финансирования.

Метробус сейчас применяется более чем в 170 городах мира. Из них половина приходится на страны Европы и Азии, а 30% на страны Латинской Америки [3]. В России полноценных систем метробуса на данный момент не существует. В качестве пилотного проекта в 2020г. была запущена единичная линия метробуса в Белгороде, длинной 2,5км. В г. Воронеж сейчас активно разрабатывают внедрение данной системы на одной из центральных улиц города. Ана-

лизируя зарубежный опыт, можно заметить, что линии метробуса быстро сталкиваются с перегрузкой в часы пик, и не справляются с пассажиропотоком [4].

Ключевой стратегией развития метробуса должна являться глобализация системы: она должна быть интегрирована в городскую среду, а не изолирована от нее. Например, в Куритибе (Бразилия), к линиям метробуса подходят подвозящие маршруты других видов транспорта. Благодаря спланированному расписанию, а, также продуманным пересадочным узлам логистика перевозок становится более удобной, что положительно сказывается на транспортных характеристиках. В Белгороде вместе с развитием метробуса проходит модернизация трамвайной сети, что так же приведет к продуктивному взаимодействию транспортных систем. Введение метробуса в транспортную сеть городов приведет к улучшению экологической обстановки, так как снижение вредных выбросов городского транспорта в атмосферу является важной задачей для всех регионов страны.

Так как на этапе строительства линий метробус требует относительно малых вложений, для многих развивающихся городов метробус может стать хорошей ступенью на пути к легкорельсовому транспорту, который, из-за большей вместимости, предпочтительнее в крупных городах и странах. Из-за схожего принципа работы и инфраструктурных параметров, линии метробуса могут быть переделаны в линии легкорельсового транспорта на наиболее нагруженных маршрутах [5]. Такой переход позволит снизить расходы при строительстве линий ЛРТ, а также позволит на практике оценить величину пассажиропотока на маршрутах до начала строительства.

Заключение

Метробус является перспективным видом транспорта для городов России. Из-за ограниченности бюджетов, многие города не могут позволить себе легкорельсовый транспорт, не говоря о строительстве полноценного метрополитена, однако проблемы перегруженности транспортной сети остаются явными. Для таких городов метробус – идеальный компромисс. Относительно низкая стоимость и короткое время ввода в эксплуатацию позволяют быстро решить проблему нарастающего пассажиропотока. Для городов, создающих сложные транспортные системы, метробус может стать хорошей отправной точкой для создания сетей легкорельсового транспорта. Таким образом, внедрение системы BRT поможет улучшить транспортную систему городов России, и сделать

общественный транспорт удобнее и быстрее даже в условиях ограниченности пространства и бюджета.

Список литературы

1. Корпач, А. А. Выбор и обоснование подвижного состава метробуса / А. А. Корпач, А. А. Корпач // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Минск, 26–29 мая 2020 года. В 2-х томах Том 1. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2020. – С. 136-139. – EDN XELEWV.

2. Гидозаров, М. А. Метробус как элемент транспортной системы: анализ эффективности и перспектив внедрения в российских городах / М. А. Гидозаров // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса : материалы XI Международной научно-практической конференции в рамках 11-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, Горловка, 28 мая 2025 года. – Горловка: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 281-284. – EDN ARLGTN.

3. Булавина, Л. В. Эффективность автобусного сообщения в Екатеринбурге / Л. В. Булавина, Л. А. Банникова, А. Р. Мухаметгалиева // Школа Науки. – 2021. – № 4(41). – С. 1-4. – EDN SZCQMV.

4. Булавина, Л. В. Совершенствование автобусного сообщения в городе как средство решения транспортных проблем / Л. В. Булавина, А. Р. Мухаметгалиева // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2020. – № 2(13). – С. 73-85. – EDN TBQJXE.

5. Дудаков, Д. С. Проблемы транспортного планирования в условиях развития современного градостроительства / Д. С. Дудаков // Архитектура и современные информационные технологии. – 2016. – № 4(37). – С. 205-217. – EDN XHERBR.

References

1. Korpach, A. A. Selection and justification of the metrobus rolling stock / A. A. Korpach, A. A. Korpach // Automotive engineering and automobile transport : Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference Minsk, May 26-29, 2020. In 2 volumes, Volume 1. Minsk: Belarusian National Technical University, 2020. pp. 136-139. - EDN XELEWV.

2. Gidozarov, M. A. Metrobus as an element of the transport system: an analysis of efficiency and prospects for implementation in Russian cities / M. A. Gidozarov // Scientific and technical aspects of the development of the motor transport complex : Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference within the framework of the 11th International Scientific Forum of the Donetsk People's Republic, Gorlovka, 28 May 2025. – Gorlovka: Donetsk National Technical University, 2025. pp. 281-284. – EDN ARLGTN.

3. Bulavina, L. V. Efficiency of bus service in Yekaterinburg / L. V. Bulavina, L. A. Bannikova, A. R. Mukhametgalieva // School of Science. – 2021. – № 4(41). – Pp. 1-4. – EDN SZCQMV.

4. Bulavina, L. V. Improving bus service in the city as a means of solving transport problems / L. V. Bulavina, A. R. Mukhametgalieva // Housing and communal infrastructure. – 2020. – № 2(13). – Pp. 73-85. – EDN TBQJXE.

5. Dudakov, D. S. Problems of transport planning in the context of the development of modern urban planning / D. S. Dudakov // Architecture and modern information technologies. – 2016. – № 4(37). – Pp. 205-217. – EDN XHERBR.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_131-146
УДК 629.11.012

Федорин Ф.Д.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Fedorin F.D.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ШАССИ АРТИЛЛЕРИЙСКОЙ УСТАНОВКИ БМ-13 «КАТЮША»

AUTOMOTIVE CHASSIS OF THE BM-13 «KATYUSHA» ARTILLERY SYSTEM

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению автомобильных шасси артиллерийских установок БМ-13. В статье приведены краткие описания автомобилей, краткие технические характеристики, а также исторические данные о применении их в качестве шасси артиллерийских установок. В заключении дается краткая оценка совершенствования автомобильных шасси за время эксплуатации установки, на основании рассмотренных технических характеристик.

Abstract. The article is devoted to the consideration of automobile chassis of BM-13 artillery installations. The article provides brief descriptions of the vehicles, brief technical specifications, as well as historical data on their use as artillery chassis. In conclusion, a brief assessment of the improvement of the automobile chassis during the operation of the installation is given, based on the technical characteristics considered.

Ключевые слова: автомобильное шасси, грузовые автомобили, артиллерийская установка, БМ-13 «Катюша».

Keywords: automobile chassis, trucks, artillery system, BM-13 "Katyusha".

Введение

Легендарная советская боевая машина реактивной артиллерии времен Великой Отечественной войны БМ-13, неофициально именовавшаяся «Катюшей», была грозным и эффективным оружием. За годы войны установка стала настоящим символом победы.

БМ-13 была принята на вооружение накануне начала Великой Отечественной Войны – 21 июня 1941 года. По заказу Государственного комитета Обороны производство реактивных установок БМ-13 «Катюша» началось незамедлительно. Первые установки собраны уже 27 июня на воронежском заводе имени Коминтерна. Война диктовала свои условия, люди вызов приняли и ге-

© Федорин Ф. Д., Прядкин В. И., 2026

роически на него ответили. Коллективы рабочих заводов сделали практически невозможное – начали массовое производство реактивных установок БМ-13 «Катюша» в условиях военного времени. Практически одновременно производство былоразвернуто на 10 заводах Москвы, Ленинграда и Урала, перейдя к унифицированной модели БМ-13Н к 1943 году, что позволило выпустить тысячи единиц.

Артиллерийская часть установки состояла из восьми направляющих, представлявших собой пятиметровые двутавры с накладками для улучшения скольжения снарядов, фермы из стальных труб, подъемного и поворотного механизмов, электрооборудования и прицельных приспособлений. В казенной части направляющих установлено стопорное устройство и электрозапал. Экипаж машины состоял из 5-7 человек [1].

Одним из главных достоинств боевой машины была мобильность установки. Время залпа БМ-13 составляло примерно 10 секунд, после чего машина быстро покидала позицию, скрываясь от ответного огня противника. Для обеспечения мобильности установка монтировались на различные шасси.

Отечественные шасси

Первые установки БМ-13 монтировались на шасси автомобиля ЗИС-6 (рис. 1). Именно на этом грузовике они прошли испытания, были приняты в производство и встретили войну 22 июня 1941года. Первая батарея реактивной артиллерии, командиром которой был назначен капитан И. А. Флёров была создана 28 июня 1941г. В её состав входили 7 установок М-13 на грузовиках ЗИС-6, две из которых были изготовлены на воронежском заводе им. Коминтерна [2].



Рисунок 1 – Артиллерийская установка БМ-13 на грузовике ЗИС-6

Тяжелый грузовой автомобиль ЗИС-6 поступил в серийное производство в 1934 году. Конструктивно он представлял собой трехосный вариант среднетоннажного грузовика ЗИС-5 и был значительно унифицирован с ним. Автомобиль имел усиленную раму и шестицилиндровый рядныйдвигатель мощностью 73л/с. В трансмиссии грузовика был использован двухступенчатый демультипликатор. Благодаря распределению массы на три моста ЗИС-6 имел хорошую проходимость по грунтовым дорогам, рыхлой почве, а также снегу. Максимальная скорость с полной нагрузкой по шоссе составляла 55 км/ч. Всего автомобилей ЗИС-6 было выпущено 21239 шт. [3]. В октябре 1941 года, в связи с эвакуацией завода на восток, выпуск их прекратили, и так и не смогли наладить заново. В связи с этим, перед конструкторами встала задача, найти подходящую замену ЗИСу и приспособить установку к монтажу на другие шасси.

Осенью 1941года установка БМ-13 была установлена на трактор СТЗ-5 (рис. 2) – советский артиллерийский тягач, предназначенный для буксировки артиллерии весом до 8 тонн или перевозки на грузовой платформе груза весом 1,5 тонны. Производство СТЗ-5 было запущено в 1937 году и продолжалось до августа 1942 года. За это время завод изготовил 9944 тягачей [4]. Трактор, имел переднее расположение кабины механика-водителя и двигателя, который располагался между сиденьями внутри кабины. Четырехцилиндровый карбюраторный многотопливный двигатель 1МА, имел полноценные системы охлаждения, смазки, питания и электрооборудования. Ходовая часть СТЗ-5 состояла из четырех обрезиненных опорных и двух поддерживающих катков с каждой стороны, направляющего катка и заднего моста с бортовыми фрикционами и тормозами по обоим сторонам.

В Красной армии тягач СТЗ-5 получил довольно высокую оценку, благодаря своей неприхотливости и надежности. Но также, отмечалась и его весьма посредственная проходимость из-за довольно узкой колеи. Из-за дефицита техники, трактору пришлось примерить на себя «Боевые» роли, для которых он никогда не предназначался. С трактора демонтировалась грузовая платформа, а ее место занимала пусковая установка. Сзади к раме крепились винтовые домкраты, позволяющие разгрузить подвеску при залпе. Всего, по некоторым данным, было собрано 117 таких машин [4]. Эти установки воевали в составе 12-го отдельного гвардейского миномётного дивизиона реактивной артиллерии, освобождая г. Сталиногорск (ныне Новомосковск), а также применялись в других боях под Москвой и под Сталинградом.Несмотря на плюсы монтажа артиллерийской системы на гусеничный тягач, все же минусов у этого решения было

больше. СТЗ-5 не мог обеспечить быстрого перемещения установок на новые огневые позиции, что являлось крайне опасным обстоятельством в условиях боя. К тому же, выпуск тягачей был прекращен в 1942 году из-за захвата немцами территории завода. Поэтому вопрос о новом шасси для “Катюши” оставался открытым.



Рисунок 2 – Восстановленная оригинальная установка БМ-13 на шасси трактора СТЗ-5 на параде Победы в г. Новомосковск. 1989 г.

Зарубежные шасси. «Ленд-Лиз»

Перед Великой Отечественной Войной автомобильная промышленность СССР была одной из самых мощных в мире, но она уступала промышленности США. На балансе РККА на 22 июня 1941года состояло 281000 автомобилей. Однако армия испытывала нехватку грузовиков. Мобилизация гражданской техники, зарубежные закупки и производство добавили 166200 автомобилей. Из-за больших потерь в начале войны, машин в РККА катастрофически не хватало. За весь период ВОВ, СССР выпустил 266000 автомобилей, а по программе Ленд-Лиз союзниками было поставлено 411800 автомобилей по данным Госдепартамента США и 312600 по советским данным. Еще 5300 автомобилей было поставлено из Великобритании [5].

Практически все автомобили, поступающие в СССР, проходили испытания на возможность монтажа артиллерийской установки. В условиях дефицита машин, если при испытаниях не было выявлено серьезных недостатков, авто-

мобиль признавался годным для этой роли, даже если заявленные характеристики машины изначально не подразумевали подобные нагрузки.

Одним их первых, поступивших в СССР по программе «Ленд-Лиз» был американский армейский грузовикChevrolet G7107. Под капотом автомобиля был верхнеклапанный шестицилиндровый двигатель Chevrolet BV1001 объёмом 3,9 л мощностью 83л/с. Коробка передач механическая, четырёхступенчатая. Колесная формула 4х4. Всего было выпущено 145826 машин этого семейства, из которых за годы войны в Советский Союз было передано 47,7 тысяч машин [6]. Несмотря на маленькую грузоподъёмность грузовика в 1,5т, запас прочности конструкции позволил смонтировать тяжелую установку М-13 на небольшое количество этих машин (рис. 3).



Рисунок 3 – Солдаты снимают защитный чехол с установки БМ-13 на шасси Chevrolet G7107

Установки БМ-13 так же устанавливались на трехосные грузовики «GMC-CCKW», которые внешне были очень схожи с грузовиками Chevrolet. Они поставлялись в СССР с 1942 по 1944 год. За этот период Советский Союз получил почти 7000 экземпляров. Грузовик оснащался 6-цилиндровым двигателем «GMC» 270 мощностью 90 л/с. Задняя тележка грузовика имела толкающие штанги, где большие рессоры выполняли так же роль балансиров. Платформа жестко крепилась сзади, а спереди при изгибах рамы она имела свободный ход по вертикали. GMC-CCKW имел две основные модификации: «353» – с колесной базой 4166 мм и «352» – с укороченной базой до 3683 мм. Так же с 1941 по 1943 год выпускался вариант «GMC CCW-353» (рис. 4), с колесной

формулой (6х4), предназначавшийся в большей степени для поставок по программе «Ленд-Лиз» [6]. По различным источникам, боевых машин БМ-13 на базе GMC-CCKWбыло выпущено около 300 шт.



Рисунок 4 – БМ-13 на грузовике GMC CCW-353

Еще один грузовик для установки БМ-13–International M-5-6 (рис. 5). Индекс модели «М5–6» расшифровывался как: «М» – («Military» – от Англ. Военный) военного назначения, «5» – грузоподъемность 5000 фунтов, «6» – число ведущих колес. С 1942 года на автомобиль устанавливался двигатель «Red Diamond-361B» на 111 л/с.Задняя тележкаInternational M-5H-6 принципиально отличалась от «CCKW»: усилия воспринимали «параллелограммы», образованные толкающими штангами сверху и кованными жесткими балансирами, которые соединяли мосты снизу. Лишь шарнирные середины балансиров, через малые рессоры, присоединялись к раме. Данная конструкция, несмотря на надёжность, получилась слишком жесткой. Это было выявлено так же на испытаниях в СССР, на которых было зафиксировано две поломки лонжеронов рам перед креплением задней тележки на моделях с короткой базой. В рамках «Ленд-Лиза» первыми в СССР поступили грузовикиInternational M-5-6х4, у которых передний мост был неведущим. Предпочтение все же отдали полноприводным версиям «М5–6» с короткой базой (3790 мм) и длинной (4293 мм) [6].

Ford-Marmon-Herrington HH6-COE4, поставлявшийся в СССР по программе «Ленд-лиз» был уникальной машиной. Он представлял собой изготовленную фирмой «Marmon-Herrington» полноприводную версиюгрузовика Ford-

198-W COE (Cab Over Engine –от Англ. Кабина над двигателем). Автомобиль имел двигатель V8 мощностью 95 л/с. Колесная база – 4010 мм. Грузоподъемность машины составляла 2,5 т.



Рисунок 5 – БМ-13 на шасси грузовика International M-5-6

Из-за неудачного решения раздаточной коробки, где вместо дифференциала использовался механизм свободного хода, трансмиссия автомобиля часто выходила из строя. Этот факт, наряду с другими недостатками автомобиля, такими как невысокая проходимость, отсутствие крюков для буксировки, сложный доступ к двигателю из кабины, а также низкая унификация с другими машинами, привел к отказу от закупок этих машин в СССР. Всего за годы войны в РККА были поставлены около 500 единственных в своем роде грузовиков «Ford-Marmon-Herrington HH6-COE4» [6]. Для других стран таких модификаций именно этого грузовика не было. Установки БМ-13, смонтированные на шасси этих грузовиков, воевали рядом с селом Коротояк, Воронежской области, а также, пройдя всю войну, применялись в Польше (рис. 6), в 1945 году.

Достаточно редким автомобилем, поставлявшимся в СССР, был Austin k6. Его основой являлся автомобиль Austin K3/YF. Austin K6 получил усиленную конструкцию рамы, кабину из металла, упрощённый дизайн с плоской решеткой радиатора и штампованными крыльями. Лобовое стекло располагалось почти вертикально. Двигатель 6-цилиндровый, верхнеклапанный, мощностью 82 л/с. Точно не известно, сколько установок БМ-13 было смонтировано на шасси этого грузовика, однако имеется достаточное количество фотографий этих машин (рис. 7).



Рисунок 6 – БМ-13 нагрузовике Ford-Marmon-Herrington HH6-COE4. Польша. 1945 г.

Еще одним английским автомобилем в красной армии был Fordson W.O.T.8 (рис. 8), выпускавшийся британским филиалом Ford. Индекс WOT расшифровывался как «военный стандартный тип». За период с 1941 по 1942 год таких машин было изготовлено 2516 экземпляров [6]. Это был небольшой грузовик, грузоподъёмностью 1,5т. Он имел двигатель V8, с нижним расположением клапанов, мощностью 85 л/с. Кабина была лишена изящества – она сваривалась из прямых листов металла и имела рубленный вид.



Рисунок 7 – Выведенная из строя установка БМ-13 на базе грузовика Austin k6
(фото forums.airbase.ru)

Из всех собранных экземпляров примерно половина была отправлена в СССР по Ленд-лизу, что в общем объёме поставок было долей процента. Как и

в случае с предыдущим автомобилем, каких-либо точных данных о количестве собранных установок БМ-13 на его базе нет.



Рисунок 8 – БМ-13 на базе Fordson W.O.T.8

Самым известным и массовым грузовиком, поставлявшимся в СССР по «Ленд-Лизу» был Studebaker-US6. Именно он стал основным шасси БМ-13 во время войны, заменив собой все многообразие грузовиков, использовавшихся для монтажа установки в 1942 году. Грузовик оснащался нижнеклапанным двигателем Hercules JXD мощностью 96 л/с [6]. Грузоподъемность на грунтовом покрытии составляла 2,5 тонны, на твердом – до 5 тонн. В середине 1942 года на грузовик стали устанавливать установку БМ-13Н (рис. 9).

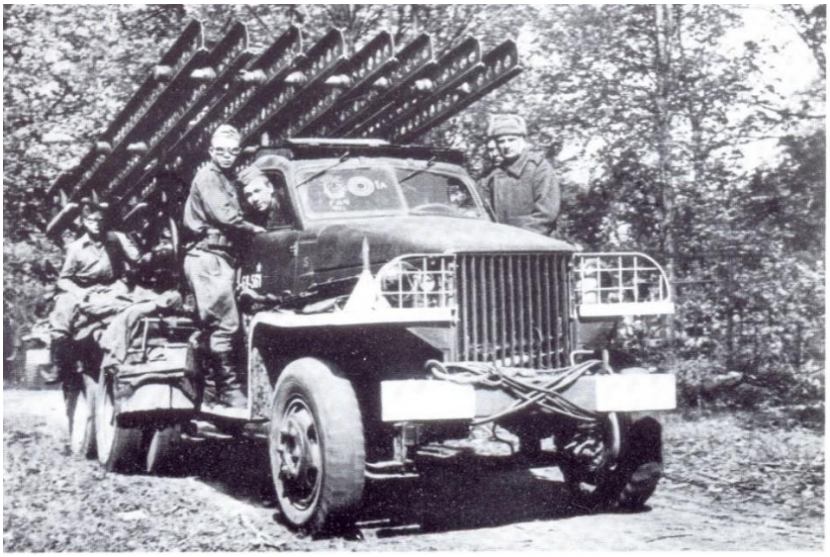


Рисунок 9 – БМ-13Н на шасси Studebaker-US6

Этот вариант стал вторым по численности, после бортового, вариантом надстройки грузовика. С 1943г. и до конца войны установка БМ-13Н монтировалась только на Studebaker-US6.За годы войны в качестве шасси для боевых машин использовались 3374 автомобиля. Из них на ЗИС-6 приходится 372 машины (11%), на Studebaker-US6 – 1845 автомобилей (54,7%), и 1157 машин (34,3%) – на остальные шасси [7]. Технические характеристики зарубежных автомобилей, на которые монтировалась установка БМ-13, приведены в таблице 1.

Послевоенные шасси

После войны встал вопрос о новом шасси для “Катюши”. Американские грузовики необходимо было заменить на отечественные, во-первых, из-за естественного старения, а во-вторых из-за политических причин. В 1947 году, 10-12 установок (по различным данным) было смонтировано на грузовики ЗИС-150 (рис. 10), выпускавшиеся с 1947 по 1957 год. Они оснащались шестицилиндровым бензиновым двигателем ЗИС-121 мощностью 92 л/с. [8]. Данные установки были показаны на параде в честь 30-летия октябрьской революции в 1947г. Вероятнее всего, небольшое количество этих установок было создано именно для демонстрации на военном параде, так как шасси гражданского ЗИС-150 не было приспособлено для использования в качестве базы для реактивной установки.

Таблица 1 – Зарубежные автомобильные шасси установки БМ-13

Показатель	Chevrolet G7107	GMC CCW-353	International M-5-6	Ford-Marmon-Herrington HH6-COE4	Austin k6	Fordson W.O.T.8	Studebaker -US6
Расположение кабины	За двигателем	За двигателем	За двигателем	Над двигателем	За двигателем	Над двигателем	За двигателем
Колесная формула	4x4	6x6	6x6	4x4	6x4	4x4	6x6
Грузоподъемность, т	1,5(ш)	4,5(ш), 2,5(г)	2,5(г)	2,5(ш) 1,5(г)	3	1,5	2,5(г), 4,5 (ш)
Полная масса, т	5	9,3	6	6	7,9	5,5	8
Максимальная мощность двигателя кВт (л/с)	61 (83)	66 (90)	81,6 (111)	69,8 (95)	60 (82)	62,5 (85)	70,6 (96)
Максимальная скорость, км/ч	78	72	72	80	70	80	72
Дорожный просвет, мм	250	250	255	250	220	305	250



Рисунок 10 – БМ-13 на грузовиках ЗИС-150 (фото WWW.CARTRUCKBUS.RU)

В 1949 году на вооружение была принята установка БМ-13НН, на шасси автомобиля ЗИС-151 (рис. 11) [9]. Артиллерийская часть установки ничем не отличалась от принятой на вооружение в 1943г. БМ-13Н, но получила новое шасси– трехосный грузовой автомобиль повышенной проходимостиЗИС-151, с колесной формулой 6х6. ЗИС-151выпускался с 1948 по 1958 г. Оснащался тем же двигателем что и ЗИС-150 и имел грузоподъёмность 4,5т. Грузовик был новым, вследствие чего выявлялось большое количество недочетов конструкции, в частности, например, двускатная ошиновка задних осей.



Рисунок 11 – Советские солдаты радом с установкой БМ-13НН на шасси ЗИС-151

В 1958г на смену автомобилю ЗИС-151 пришел новый грузовик ЗИЛ-157. Этот грузовик был создан на базе предшественника, но имел усовершенство-

ванную конструкцию. Основным нововведением по сравнению с ЗИС-151, значительно улучшившим проходимость автомобиля было применение односкатной ошиновки грузовика. Стали использоваться шины большей размерности, а также появилась система регулирования давления в шинах. Автомобиль так же получил более мощный двигатель на 104 л/с [11]. Установки, смонтированные на шасси ЗИЛ-157, получили индекс БМ-13НМ (рис.12) [9]. Именно грузовики ЗИС-151 и ЗИЛ-157 сформировали облик послевоенной “Катюши”. В таком виде они стояли на вооружении СССР после войны, а также поставлялись в дружественные страны.



Рисунок 12 – Установки БМ-13 на грузовиках ЗИЛ-157

Последней модификацией БМ-13 стала БМ-13НММ (рис. 13), принятая на вооружение в 1966г. Артиллерийская часть установки все так же не изменилась, однако в этой модификации была добавлена подножка для наводчика, монтируемая на раму автомобиля [9]. Данная модификация устанавливалась на автомобиль ЗИЛ-131, который был запущен в производство в 1966г. грузоподъёмность автомобиля составляла 3,5т. Грузовик оснащался бензиновым двигателем V8 мощностью 150л/с [12]. Технические характеристики отечественных автомобилей, на которых монтировалась установка БМ-13, приведены в таблице 2.

Помимо рассмотренных в статье грузовиков и трактора, большое количество БМ-13 было установлено на бронекатера, в классической, или немного измененной «морской» модификации. В частных случаях, когда автомобиль выходил и строя, а установка была еще пригодна к эксплуатации, она монтирова-

лась на прицепы силами небольших ремонтных мастерских. Такие случаи подтверждаются описаниями и фотографиями военных лет. В книге П. М. Федина «Воронежская Катюша» [2] говорится о разработке нескольких экземпляров установок БМ-13 смонтированных на сани, собранных для Сталинградского фронта.

Таблица 2 – Отечественные автомобильные шасси установки БМ-13

Показатель	ЗИС-6	СТЗ-5	ЗИС-150	ЗИС-151	ЗИЛ-157	ЗИЛ-131
Расположение кабины	За двигателем	Над двигателем	За двигателем	За двигателем	За двигателем	За двигателем
Колесная формула	6х4	Гусеничный ход	4х2	6х6	6х6	6х6
Грузо-подъемность, т	4(ш) 2,5(г)	1,5	4 (ш)	4,5 (ш)	4,5(ш)	5(ш), 3(г)
Полная масса, т	8,2	7,3	8,1	10,1	10,2	10,4
Максимальная мощность двигателя кВт (л/с)	53,7 (73)	38,2-41,2 (52-56)	67,7 (92)	67,7 (92)	80 (104)	110 (150)
Максимальная скорость, км/ч	55	22	65	60	65	85
Дорожный просвет, мм	290	288	265	260	310	330

Всё многообразие шасси давало установке БМ-13 главное преимущество на поле боя – мобильность. Именно поэтому, инженеры постоянно искали наиболее подходящую базу для установки, исходя из условий времени и ситуации. В таблицах 1 и 2приведены краткие технические характеристики всех автомобилей, рассмотренных в статье. Из этих таблиц видно, что за весь период эксплуатации, автомобильные шасси установки БМ-13 становились более мощными и проходимыми. Во время войны, однако, среди иностранных автомобилей (Табл.1) не прослеживается улучшения характеристик. Это обосновано тем, что в условиях дефицита автомобилей в 1941 – 1942 гг, критерии оценки для выбора автомобильных шасси установки были сильно понижены.

Однако по таблице 2 видно, что после войны установка БМ-13 каждый раз устанавливалась автомобиль, который всеми характеристиками превосходил предыдущий. Так, за весь период эксплуатации БМ-13 мощность двигателя автомобильных шасси выросла с 52 л/с (СТЗ-5) и 73л/с (ЗИС-6) до 150 л/с (ЗИЛ-131). Дорожный просвет увеличился с 288 и 290 до 330 соответственно. Так же заметно что приоритет отдавался полноприводным автомобилям. Поиск

новых шасси и возрастание их характеристик показывают важность установки БМ-13 для советской армии.



Рисунок 13 – Установка БМ-13 на шасси ЗИЛ-131 ВС Перу (фото PeruDefensa.com)

Весь накопленный опыт как технической эксплуатации, так и боевого применения «Катюш» послужил мощной базой для совершенствования ракетных систем залпового огня, а также сформировал требования к шасси для ракетных установок. Так, например, для преемника «Катюши», БМ-21 «Град» в качестве шасси в настоящее время используется УРАЛ-4320. Автомобиль по своим характеристикам превосходит все автомобильные шасси для БМ-13 (грузоподъемность 5 тонн, дизельные двигатели ЯМЗ мощностью 230–310 л/с., клиренс 400 мм, скорость до 85 км/ч). У грузовиков, предназначенных для монтажа ракетной установки, выхлопная труба выведена под передний бампер, в целях безопасности. Устойчивость в огневой позиции обеспечивается двумя нижними стабилизаторами в отличие от винтовых домкратов у «Катюши».

Заключение

1. Благодаря героическому труду советского народа, в кратчайшие сроки, в режиме строгой секретности, на гражданских заводах страны было освоено производство реактивных установок залпового огня БМ-13, на неприспособленном для этих целей оборудовании.

2. Накопленный за время Второй мировой войны опыт позволил разработать новые требования к колесному шасси для установок залпового огня для стрельбы по площадям. Установлено, что автомобильное шасси должно быть

трехосным, полноприводным, с односкатной ошиновкой всех осей и расположенными в один ряд колесами. Для повышения проходимости шасси при преодолении труднопроходимых участков местности их необходимо оборудовать системой автоматической подкачки шин.

3. Установка БМ-13 послужила основой развития отечественных систем залпового огня. Накопленный опыт применения «Катюши» позволил создать более совершенную боевую машину – БМ-21 «Град». Конструктивно отличавшуюся от БМ-13 достаточно сильно. Вместо рельсовых направляющих стали применять трубчатые, что позволило повысить точность стрельбы, при этом дальность стрельбы возросла с 8км у «Катюши» до 21км у «Града». Масса снаряда так же возросла с 42 до 80 кг.

4. В настоящее время современная установка БМ-21 "Град" является так же грозным оружием на фронтах СВО, как БМ-13 на фронтах Великой Отечественной Войны. «Катюша» стала символом победы. Она положила начало новому в то время направлению – реактивной артиллерии, которая наилучшим образом зарекомендовала себя в сражениях Великой Отечественной Войны и остается незаменимой в настоящее время.

Список литературы

1. Малышенко, В. А. «Катюша» БМ-13 - орудие победы / В. А. Малышенко // Мавлютовские чтения : материалы XIV Всероссийской молодежной научной конференции: в 7 т., Уфа, 01–03 ноября 2020 года. Том 6 Часть 1. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. – С. 11. – EDN LWGCIQ.

2. Федин, П. М. Воронежская «катюша». Издание второе, исправленное и дополненное / П. М. Федин // Воронеж: Центр.-Черноозем. кн. изд-во,1988. – 87 с.

3. Тяжелый грузовой автомобиль Зис-6. Инженерные заметки. Армии и солдаты. – URL: https://armedman.ru/avtobronetehnika/1919-1936-avtobronetehnika/zis-6-trehosnyiy-gruzovik.html.

4. Легкий артиллерийский трактор СТЗ-5-НАТИ. Инженерные заметки. Армии и солдаты. – URL: https://armedman.ru/artilleriya/1937-1945-artilleriya/legkiy-artilleriyskiy-traktor-stz-5-stalinets.html.

5. Давыдов, С. Г. Значение союзных поставок вооружений и автомобильной техники для Красной армии в годы Великой отечественной войны / С. Г. Давыдов, Г. Г. Попов // Военный академический журнал. – 2023. – № 2(38). – С. 61-70. – EDN HHKIFZ.

6. Соколов, М. В. АвтоНАШЕСТВИЕ на СССР. Трофейные и лендлизовские автомобили / М. В. Соколов ; Михаил Соколов. – Москва : Яуза, 2011. – (Война моторов). – ISBN 978-5-699-45024-4. – EDN QVBIDZ.

7. Быковская, Г. А. Российская школа оружия: реактивный миномет "Катюша" / Г. А. Быковская, В. Д. Черных, Р. А. Черенков // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2016. – № 11-1(73). – С. 33-36. – EDN WNDYWZ.

8. Кочнев, Е. Д. Автомобили Советской Армии 1946-1991 / Е. Д. Кочнев. – Москва: Яуза, Эскмо, 2011. – 40 с.

9. Цыбышев, В. А. БОЕВЫЕ МАШИНЫ БМ-13Н, БМ-13НМ, БМ-13НММ. Руководство службы / В. А. Цыбышев, Е. Н. Слепцова, В. Е. Посохина. Третье издание, исправленное. – Москва: Ордена Трудового Красного Знамени военное издательство Министерства обороны СССР, 1974. – 131 с.

10. Арманд, Г. Б. АВТОМОБИЛЬ ЗИС-151 / Г. Б. Арманд, С. И. Кузнецов. – Москва: Ордена Трудового Красного Знамени военное издательство Министерства обороны СССР, 1955. – 256 с.

11. АВТОМОБИЛЬ ЗИЛ-157 / В. С. Перлин, Я. Е. Голодовский, Ю. В. Исполатов, Р. Г. Каламкаров, А. В. Подколзин, В. А. Румянцев. – Москва: Ордена Трудового Красного Знамени военное издательство Министерства обороны СССР, 1960. – 166 с.

12. Автомобиль ЗИЛ-131 и его модификации. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ТО. – Москва: Ордена Трудового Красного Знамени военное издательство Министерства обороны СССР, 1980. – 319 с.

References

1. Malyshenko, V. A. Katyusha BM-13 - the instrument of victory / V. A. Malyshenko // Mavlyutov readings : proceedings of the XIV All-Russian Youth Scientific Conference: in 7 volumes, Ufa, November 01-03, 2020. Volume 6, Part 1. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2020, p. 11. EDN LWGCIQ.

2. Fedin, P. M. Voronezh "Katyusha". Second edition, revised and expanded / P. M. Fedin // Voronezh: Center.-Chernozem. Publishing House, 1988. – 87 p.

3. Heavy truck Zis-6. Engineering notes. Armies and soldiers – URL: https://armedman.ru/avtobronetehnika/1919-1936-avtobronetehnika/zis-6-trehosnyiy-gruzovik.html.

4. Light artillery tractor STZ-5-NATI. Engineering notes. Armies and soldiers – URL: https://armedman.ru/artilleriya/1937-1945-artilleriya/legkiy-artilleriyskiy-traktor-stz-5-stalinets.html.

5. Davydov, S. G. The importance of allied supplies of weapons and automotive equipment for the Red Army during the Great Patriotic War / S. G. Davydov, G. G. Popov // Military Academic Journal. – 2023. – № 2(38). – Pp. 61-70. – EDN HHKIFZ.

6. Sokolov, M. V. The invasion of the USSR. Trophy and land-based cars / M. V. Sokolov; Mikhail Sokolov. Moscow : Yauza Publ., 2011. (War of Motors). – ISBN 978-5-699-45024-4. – EDN QVBIDZ.

7. Bykovskaya, G. A. The Russian school of weapons: Katyusha rocket launcher / G. A. Bykovskaya, V. D. Chernykh, R. A. Cherenkov // Historical, philosophical, political and legal sciences, cultural studies and art criticism. Questions of theory and practice. – 2016. – № 11-1(73). – Pp. 33-36. – EDN WNDYWZ.

8. Kochnev, E. D. Cars of the Soviet Army 1946-1991 / E. D. Kochnev. – Moscow: Yauza, Eskmo, 2011. – 40 p.

9. Tsybyshev, V. A. COMBAT VEHICLES BM-13H, BM-13NM, BM-13NMM. Service management. Third edition, revised / V. A. Tsybyshev, E. N. Sleptsova, V. E. Posokhina. – Orders of the Red Banner of Labor military Publishing House Ministry of Defense of the USSR. – Moscow, 1974. – 131 p.

10. Armand, G. B. ZIS-151 AUTOMOBILE / G. B. Armand, S. I. Kuznetsov. – Orders of the Red Banner of Labor military Publishing House Ministry of Defense of the USSR. – Moscow, 1955. – 256 p.

11. CAR ZIL-157 / V. S. Perlin, Ya. E. Golodovsky, Yu. V. Ispolatov, R. G. Kalamkarov, A.V. Podkolzin, V. A. Rumyantsev. – Orders of the Red Banner of Labor military Publishing House Ministry of Defense of the USSR. – Moscow, 1960. – 166 p.

12. The ZIL-131 car and its modifications. Technical description and operating instructions. TO. – Orders of the Red Banner of Labor military Publishing House Ministry of Defense of the USSR. – Moscow, 1980. – 319 p.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_147-153
УДК 629.621.43.018

Федорин Ф.Д.
студент 5 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Колядин П.А.
старший преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Мураткин С.Е.
преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Fedorin F.D.
5th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Kolyadin P.A.
senior lecturer of the department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Muratkin S.E.
lecturer at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ПОЛИГОНЫ В РОССИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ШИН: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ

LANDFILLS IN RUSSIA FOR TIRE TESTING: DOMESTIC EXPERIENCE

Аннотация. В статье приведен аналитический обзор эволюционного развития полигона для испытаний шин в России. Отмечено, что в России объем испытаний шин неуклонно растет, что требует постоянного совершенствования инфраструктуры полигона. Перспективным направлением развития отечественной испытательной инфраструктуры является создание и совершенствование всесезонных полигонов для испытания автомобильных шин.

Abstract. The article provides an analytical review of the evolutionary development of a tire testing ground in Russia. It is noted that the volume of tire testing in Russia is steadily increasing, which requires constant improvement of the landfill infrastructure. A promising area for the development of the domestic testing infrastructure is the creation and improvement of all-season testing grounds for automobile tires.

Ключевые слова: автомобильная шина, полигон, испытания, специальные дороги, искусственные неровности, комбинированные маршруты.

Keywords: car tires, landfills, tests, special roads, artificial bumps, combined routes.

© Федорин Ф. Д., Татаринцев В. Ю., Колядин П. А., Мураткин С. Е., Прядкин В. И., 2026

Введение

Автомобильная шина является важным узлом автомобиля, влияющим на его эксплуатационные свойства.

Весь основной процесс функционирования автомобиля с механической точки зрения реализуется во взаимодействии пневматической шины колес с опорной поверхностью дороги. Поэтому на полигонах выявляются параметры и характеристики шин, влияющие на экономичность, безопасность, комфортабельность автомобиля в движении, а также долговечность как самих шин, так и автомобиля. Получаемая при испытаниях на полигонах информация, необходима как в интересах пользователей и заказчиков, так и для совершенствования технологического процесса испытаний [1,2,3].

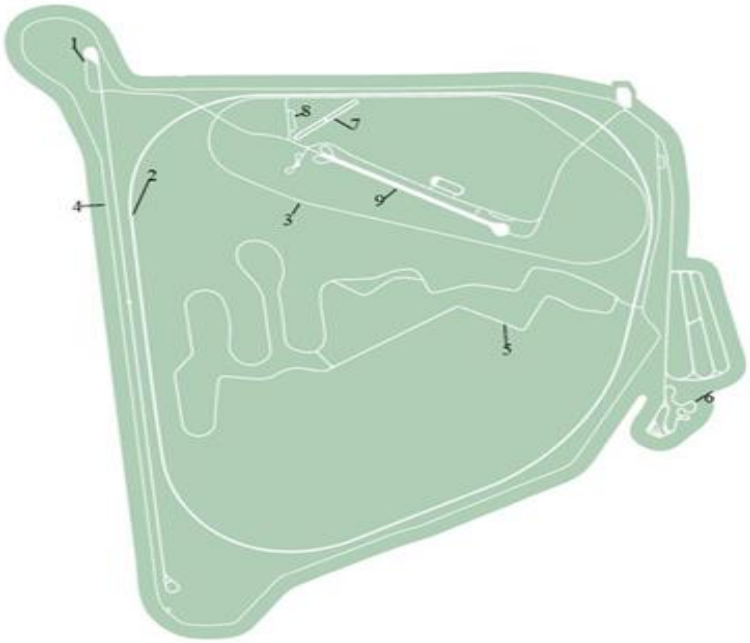
В настоящее время в России функционируют три аккредитованных испытательных центра, в НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» (г. Дмитров, Московская обл.), ООО «ШИЦ «Вершина» (г. Ярославль), НТЦ «КАМА» (г. Нижнекамск, Республика Татарстан), на этих центрах проводят сертификационные испытания шин. Сертификационные испытания шин на полигонах включает проверку на безопасность, уровень шума, сцепные свойства на разных покрытиях, износостойкость и характеристики при экстремальных температурах.

Испытания автомобильных шин на полигонах являются надежным средством оценки их качества. С этой целью на полигонах имеются специальные дороги, позволяющие оценить износостойкость, надежность шин при движении автомобилей с высокой скоростью, при больших динамических нагрузках, возникающих при преодолении искусственных неровностей, при движении на извилистых дорогах, и на специальных комбинированных маршрутах, состоящих из набора различных дорог и в сложных условиях [1, 4, 5, 6].

Мощности ФГУП «НАМИ» включают в себя множество лабораторий, испытательные стенды и дорожные сооружения, а также необходимые технологии для проведения различных видов испытаний.

Для полноценных исследований шин требуются особые трассы, инфраструктура и оборудование (рис. 1). Так, на полигон НАМИ имеет комплекс из шести параллельно расположенных дорог протяженностью по 1 км: «короткие волны», «бельгийская мостовая», «шумосоздающая дорога», «выбитый булыжник», «ровный булыжник» и участки дороги с различным коэффициентом сцепления. Участки дорог с разным коэффициентом сцепления необходимы для оценки управляемости, тормозных свойств, внешнего шума шин. Дорога типа

«Бельгийская мостовая», представляет собой неровную брусчатку, воспроизводящую старинные мощеные дороги (рис. 2).



1 – Динамометрическая дорога (ДД); *2* – Скоростная дорога (СД); *3* – Мощеная дорога (МД); *4* – Грунтовая испытательная дорога (ГИД); *5* – Грунтовая испытательная дорога (ГИД); *6* – Дорога горного типа (ДГТ); *7* – Трек со сменными неровностями (ТН); *8* – Щебеночная дорога (ЩД); *9* – Специальные испытательные дороги (СИД)

Рисунок 1 – Схема полигона НАМИ

Покрытие дороги выполнено из гранитных блоков. Поверхность имеет большие неровности в виде впадин овальной формы и малые неровности, обусловленные разностью уровненй верхней плоскости блоков. Шумосоздающая дорога представляет собой горизонтальную прямолинейную дорогу шириной 5 м, гладко замощенную брусчатку (рис. 3).



Рисунок 2 – Участок мощеной спецдороги «бельгийская мостовая»

Неровности лицевой поверхности камней и швы между камнями вызывают при движении автомобиля высокочастотные колебания колес, создающие, в свою очередь, вибрации и шум как неподрессоренных (включая шины), так и подрессоренных частей автомобиля (рис. 4).



Рисунок 3 – Участок мощеной шумосоздающей дороги

Для того, чтобы испытать шины, дороги должны позволять длительно двигаться с высокой скоростью. Чтобы не снижать скорость на разворотах, радиусы разворотов принимаются с учетом размеров и формы площади возможно большими для снижения центробежной силы. В противном случае необходимо применять слишком большие углы наклона виражей, что приводит к большому росту радиальной нагрузки на шину, искажению реального взаимодействия автомобиля с дорогой, усложнению строительства дороги [2, 4, 7, 8].

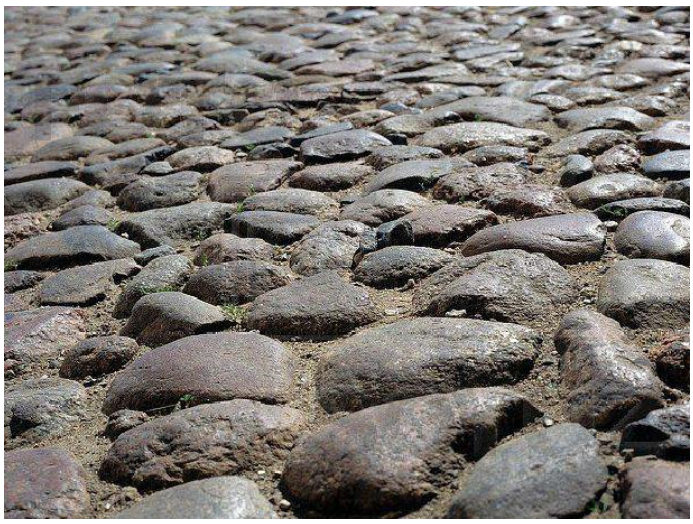


Рисунок 4 – Участок мощеной дороги «выбитый булыжник»

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам сцепления шины с дорогой. С этой целью на полигонах построены специальные дороги с различной шероховатостью и структурой покрытия. Дороги имеют систему по-

лива с регулируемой его интенсивностью, что позволяет оценить качество рисунка протектора и в целом конструкции шины по сцеплению с дорогой. Испытания по определению скорости аквапланирования, при которой автомобиль становится неуправляемым, и шина полностью теряет сцепление с мокрой дорогой. Проводят на специальной дороге с системой полива различной интенсивности, создающей на поверхности дороги водяной слой различной толщины (рис. 5).

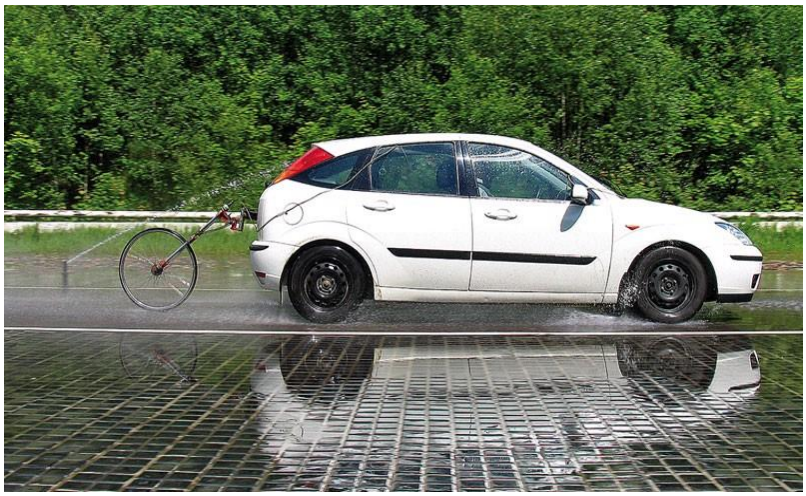


Рисунок 5 – Участок с базальтовым покрытием и искусственным водополивом

При испытаниях на полигонах обычно создаются для шин более тяжелые условия, чем в эксплуатации: шины часто испытывают при более высоких скоростях, чем они работают в условиях рядовой эксплуатации, больший радиальной нагрузке, устанавливается длительный безостановочный режим движения автомобиля (рис. 6).



Рисунок 6 – Мощеная кольцевая дорога

Однако данные центры не могут проводить исследовательские и доводочные дорожные испытания шин в круглогодичном режиме [9, 10].

Заключение

Проведённый анализ показал, что испытательные полигоны являются важнейшим элементом оценки эксплуатационных и технических характеристик автомобильных шин. Современный испытательный полигон должен представлять собой комплекс специализированных дорожных участков и измерительного оборудования, обеспечивающих возможность определения сцепных, тормозных и тяговых свойств шин, их управляемости, износостойкости, сопротивления качению, уровня шума и устойчивости к аквапланированию.

Российская испытательная база располагает необходимой инфраструктурой для проведения сертификационных испытаний шин. Вместе с тем сохраняется необходимость дальнейшего развития специализированных испытательных комплексов, обеспечивающих проведение исследовательских и доводочных испытаний в течение всего года. Особое значение имеет возможность воспроизведения различных сочетаний температуры, влажности, состояния дорожного покрытия и скорости движения, поскольку данные факторы непосредственно влияют на результаты испытаний.

Перспективным направлением развития отечественной испытательной инфраструктуры является создание и совершенствование всесезонных полигонов для испытания автомобильных шин. Развитие таких комплексов позволит расширить возможности научно-исследовательских и доводочных работ, повысить объективность оценки характеристик шин и снизить зависимость от зарубежной испытательной инфраструктуры. Важным условием дальнейшего развития является объединение дорожных, лабораторных и автоматизированных методов испытаний в единую систему, обеспечивающую получение воспроизводимых и сопоставимых результатов.

Создание всесезонного центра испытаний шин в России позволит сократить издержки производителей, что положительно скажется на отрасли в целом и стоимости конечной продукции.

Список литературы

1. Вахламов, В. К. Автомобили: эксплуатационные свойства : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Вахламов. - М.: Издательский центр "Академия", 2005. - 240 с.

2. Евзович, В. Е. Автомобильные шины, диски и ободья / В. Е. Евзович, П. Г. Райбман - М.: Автополис-плюс, 2010 - 144 с.

3. Бакфиш, К. Новая книга о шинах / К. Бакфиш, Д. Хайнц. – М.: ООО «Издательство Астрель, ООО «Издательство АСТ», 2003. - 303 с.

4. Безверхий, С. Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификации автомобилей / С. Ф. Безверхий, Н. Н. Яценко. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 600 с.

5. Гуслицер, Р. Л. Шины и автомобиль / Р. Л. Гуслицер. – М., 2007. – 283 с.

6. Испытания автомобилей / В. Б. Цимбалин, В. Н. Кравец, С. М. Кудрявцев, И. Н. Успенский, В. И. Песков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

7. ГОСТ 5513-2012. Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним и легких грузовых автомобилей. Технические условия.

8. ГОСТ 4754-97. Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним, легких грузовых автомобилей и автобусов особо малой вместимости. Технические условия. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200017825.

9. UNECE Regulation No. 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or adhesion on wet surfaces and/or rolling resistance. — URL: https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120 (дата обращения: 02.09.2026).

10. ФГУП «НАМИ». В ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» обсудили вопрос создания всесезонной испытательной инфраструктуры для шинной продукции. — 2024. — URL: https://nami.ru/news/1639 (дата обращения: 02.09.2026).

References

1. Cars: Operational Properties. Textbook for students of higher educational institutions / V.K. Vakhlamov. - Moscow: Publishing Center “Academy”, 2005. - 240 p.

2. Car Tires, Rims and Wheels / V.E. Evzovich, P.G. Raibman - Moscow: Avtopolis-Plus, 2010 - 144 p.

3. A New Book about Tires / K. Bakfish, D. Heinz. — Moscow: 000 “Astrel Publishing House”: 000 “ACT Publishing House”. 2003. — 303 p.

4. Bezverkhiy S.F., Yatsenko N.N. Fundamentals of Technology for Field Testing and Vehicle Certification. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1996. — 600 p.

5. Guslitser R.L. Tires and the Car. – Moscow: 2007. – 283 p.

6. Car Testing / V.B. Tsimbalin, V.N. Kravets, S.M. Kudryavtsev, I.N. Uspensky, V.I. Peskov. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 199 p.

7. GOST 5513-2012. Pneumatic tires for passenger cars, trailers for them, and light trucks. Technical specifications.

8. GOST 4754-97. Pneumatic tires for passenger cars, trailers for them, light trucks, and buses of extra-small capacity. Technical specifications. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200017825.

9. UNECE Regulation No. 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or adhesion on wet surfaces and/or rolling resistance — URL: https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120 (accessed: 02.09.2026).

10. FSUE “NAMI”. At the State Research Center of the Russian Federation, FSUE “NAMI”, the issue of creating an all-season testing infrastructure for tire products was discussed — 2024. — URL: https://nami.ru/news/1639 (accessed: 02.09.2026).

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_154-165
УДК 629.4.082

Хрипченко М.С.
кандидат техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Панченко С.Л.
кандидат техн. наук, доцент кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Головин А.С.
студент Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Татаринцев В.Ю.
ассистент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Khripchenko M.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

Panchenko S.L.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

Golovin A.S.
student of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

Tatarintsev V.Yu.
assistant of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗИНОКОРДНЫХ ПРИВОДНЫХ РЕМНЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

FEATURES OF OPERATION OF RUBBER-CORD DRIVE BELTS OF CARS IN ARCTIC CONDITIONS

Аннотация. В работе рассмотрены особенности эксплуатации резинокордных приводных ремней автомобилей в условиях Арктики. Проанализировано влияние низких температур, влажности и обледенения на свойства резинотехнических материалов. Показано, что снижение температуры приводит к увеличению жёсткости и хрупкости резины, что ухудшает эксплуатационные характеристики ремней. Рассмотрены основные виды повреждений, возникающих в данных условиях. Описаны конструкционные и материальные решения, направленные на повышение надёжности ременных передач. Представлены основные методы диагностики и профилактики отказов. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода к повышению долговечности ремней в условиях Крайнего Севера.

Abstract. This paper examines the operating characteristics of rubber-cord drive belts in vehicles operat-ing in Arctic conditions. The impact of low temperatures, humidity, and icing on the properties of rub-ber materials is analyzed. It is shown that lower temperatures lead to increased rubber stiffness and brittleness, which degrades belt performance. The main types of damage occurring in these conditions are discussed. Design and material solutions aimed at improving the reliability of belt drives are de-scribed. Key methods for diagnosing and preventing failures are presented. A conclusion is drawn re-garding the need for an integrated approach to improving belt durability in the Far North.

© Хрипченко М. С., Панченко С. Л., Головин А. С., Татаринцев В. Ю., 2026

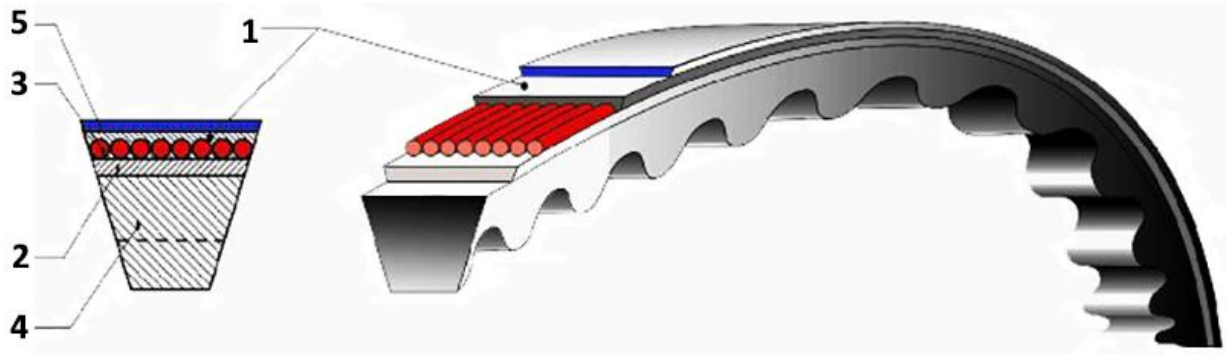
Ключевые слова: резинокордные ремни, Арктика, низкие температуры, износ, надёжность, резинотехнические изделия, эксплуатация, диагностика.

Keywords: rubber-cord belts, Arctic, low temperatures, wear, reliability, rubber products, operation, diagnostics.

Введение

Эксплуатация автомобильной техники в арктической зоне протекает в условиях одновременного действия экстремально низких температур, повышенной влажности, ветровых нагрузок и интенсивного обледенения. Совокупность указанных факторов формирует особый режим функционирования машин, при котором стандартные эксплуатационные характеристики материалов и узлов уже не могут рассматриваться как достаточные. Температура атмосферного воздуха в таких регионах способна опускаться ниже −50 °С, что существенно отражается на работоспособности конструкционных и функциональных элементов автомобиля [6]. При столь низких температурах изменяются механические свойства материалов, возрастает хрупкость, снижается эластичность, а также усиливается неравномерность тепловых и механических нагрузок на сопряжённые детали.

Особую значимость в этих условиях приобретает надёжность привода вспомогательных агрегатов, поскольку именно через него обеспечивается функционирование ряда жизненно важных систем автомобиля. К критически важным элементам данного привода относятся резинокордные приводные ремни (рис. 1), посредством которых механическая энергия передаётся от коленчатого вала двигателя к генератору, насосам, компрессорам и другим системам.



1 – слой растяжения (резина); *2* – эластичный слой (резина); *3* – несущий слой (кордшнур); *4* – слой сжатия (резина); *5* – обертка (ткань)

Рисунок 1 – Устройство забчатого приводного ремня

Нарушение работоспособности ремня влечёт за собой не только отказ отдельных агрегатов, но и может привести к остановке двигателя и потере по-

движности техники в удалённых районах, где своевременный ремонт или замена элемента затруднены. Таким образом, исследование поведения резинокордных приводных ремней в условиях арктической эксплуатации представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой непосредственно связано с повышением надёжности автомобильной техники в целом.

Надёжность функционирования ременных передач непосредственно определяет работоспособность автомобиля в целом, поскольку именно они обеспечивают кинематическую связь между двигателем и вспомогательными агрегатами. В условиях низких температур отказ приводного ремня способен вызвать не только остановку двигателя, но и нарушение работы систем жизнеобеспечения, к которым относятся генератор, системы охлаждения, отопления и другие агрегаты, критически важные для функционирования техники. Подобное развитие событий приобретает особую опасность при эксплуатации машин в удалённых арктических районах, где отсутствует возможность оперативного ремонта, а внешние климатические условия исключают длительное пребывание человека вне кабины.

Следует учитывать, что отказ ремня в таких условиях носит, как правило, внезапный характер и сопровождается цепной реакцией: прекращение передачи механической энергии приводит к последовательному отключению зависимых систем, что существенно снижает безопасность и мобильность транспортного средства. В связи с этим изучение особенностей работы резинокордных ремней при низких температурах, а также разработка методов повышения их долговечности представляют собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой напрямую связано с обеспечением надёжности автомобильной техники, эксплуатируемой в экстремальных климатических условиях.

Ключевым фактором, определяющим поведение резинокордных материалов в арктических условиях, выступает трансформация их физико-механических характеристик по мере понижения температуры. Резина, являясь полимерным материалом, склонна к переходу в стеклообразное состояние при достижении определённой температуры — температуры стеклования. Данный переход носит не постепенный, а пороговый характер: при приближении к температуре стеклования подвижность макромолекулярных цепей резко ограничивается, вследствие чего материал утрачивает способность к высокоэластическим деформациям. В стеклообразном состоянии эластичность резины существенно снижается, а модуль упругости возрастает, что коренным образом меняет характер её деформирования под нагрузкой.

Понижение температуры инициирует комплекс взаимосвязанных эффектов, каждый из которых вносит вклад в снижение работоспособности ремня:

– возрастание жёсткости резиновой матрицы, приводящее к увеличению сопротивления деформированию;

– ослабление способности к упругим деформациям, что ограничивает возможность ремня приспосабливаться к изменению геометрии шкивов;

– усиление хрупкости материала, повышающее вероятность образования трещин;

– уменьшение сопротивляемости ударным и циклическим нагрузкам, что ускоряет накопление усталостных повреждений.

Совокупное действие перечисленных эффектов приводит к тому, что ремень теряет способность эффективно огибать шкивы, вследствие чего возникают локальные концентрации напряжений и интенсифицируется процесс разрушения. Наиболее опасным режимом при этом является холодный пуск двигателя, при котором ремень испытывает резкие динамические нагрузки на фоне пониженной пластичности материала. Именно сочетание низкой температуры и кратковременных пиковых нагрузок создаёт условия для ускоренного развития дефектов и последующего отказа.

Вследствие описанных изменений ремень утрачивает способность эффективно огибать шкивы, что приводит к нарушению равномерного распределения контактных усилий по дуге обхвата. Как следствие, в отдельных зонах возникают локальные концентрации напряжений, которые интенсифицируют процессы накопления повреждений и ускоряют разрушение материала. Особую опасность представляет режим холодного пуска двигателя: в этот момент ремень подвергается резким динамическим нагрузкам, обусловленным повышенным сопротивлением вращению агрегатов, при этом пластичность материала остаётся пониженной из-за низкой температуры. Сочетание указанных факторов создаёт условия для возникновения пиковых напряжений, превышающих допустимые значения, что может привести к преждевременному отказу ремня.

Температурный фактор оказывает воздействие не только на резиновую матрицу, но и на корд, выполняющий функцию несущего элемента ремня. Поскольку резина и корд обладают различными коэффициентами термического расширения, при изменении температуры их деформации протекают неодинаково. Это несоответствие приводит к возникновению внутренних напряжений на границе раздела материалов, которые способствуют нарушению адгезионной связи между слоями и последующему расслоению конструкции. Расслоение, в

свою очередь, снижает несущую способность ремня и создаёт предпосылки для его дальнейшего разрушения под действием эксплуатационных нагрузок.



Рисунок 2 – Виды различных дефектов приводных ремней

Арктические условия эксплуатации отличаются совокупным воздействием нескольких неблагоприятных факторов, каждый из которых оказывает самостоятельное влияние на состояние материалов и узлов, а в сочетании они формируют качественно новую среду функционирования техники. К числу таких факторов относятся низкие температуры, циклические температурные переходы, повышенная влажность, обледенение, ветровые нагрузки и увеличенное сопротивление вращению агрегатов. Продолжительное воздействие низких температур вызывает постепенную деградацию структуры резины, которая проявляется в изменении надмолекулярной организации полимера и снижении подвижности макромолекулярных цепей. Особую роль при этом играют повторяющиеся циклы «замораживание–оттаивание»: при каждом переходе через температурный порог в материале возникают знакопеременные деформации, обусловленные различием теплового расширения компонентов. Подобные циклические воздействия способствуют образованию микротрещин, которые локализуются преимущественно в наиболее напряжённых зонах. По мере накопления

микротрещины укрупняются, объединяются между собой и формируют макродефекты, что приводит к снижению прочностных характеристик материала и создаёт предпосылки для дальнейшего разрушения ремня под действием эксплуатационных нагрузок.

Повышенная влажность воздуха в сочетании с резкими колебаниями температуры создаёт условия для образования инея и льда на поверхности ремня и шкивов. При контакте влаги с охлаждёнными элементами происходит её конденсация с последующей кристаллизацией, в результате чего на рабочих поверхностях формируется тонкий слой льда. Наличие такого слоя изменяет характер взаимодействия ремня со шкивом и приводит к ряду негативных последствий:

– снижению коэффициента трения в зоне контакта;

– проскальзыванию (пробуксовке) ремня относительно шкива;

– неравномерному распределению нагрузки по длине ремня и дуге обхвата;

– ускоренному изнашиванию рабочих поверхностей.

Пробуксовка, возникающая вследствие снижения трения, сопровождается дополнительным выделением тепла и повышением локальной температуры в зоне контакта. Это, в свою очередь, усиливает износ и способствует неравномерному натяжению ремня, что ещё больше нарушает условия его работы. При низких температурах вязкость моторных и трансмиссионных масел значительно возрастает, что приводит к увеличению сопротивления вращению агрегатов. В результате на ремень передаются повышенные нагрузки, особенно в момент запуска двигателя, когда сопротивление вращению максимально, а эластичность материала ремня снижена из-за низкой температуры. Сочетание повышенной нагрузки и пониженной деформационной способности создаёт условия для возникновения пиковых напряжений, которые могут превышать допустимые значения и приводить к ускоренному накоплению повреждений.

Конструкционные и материальные решения

Обеспечение надёжной работы приводных ремней в условиях Арктики требует применения специальных материалов и конструктивных решений, поскольку стандартные эластомеры не способны сохранять требуемые эксплуатационные свойства при экстремально низких температурах. Выбор материалов и геометрии ремня должен осуществляться с учётом всего комплекса неблаго-

приятных факторов: низких температур, циклических переходов, влажности и повышенных нагрузок.

Материалы резиновой основы. Наиболее перспективными для применения в арктических условиях являются следующие типы эластомеров:

– этилен-пропиленовые каучуки (EPDM), обладающие высокой морозостойкостью и устойчивостью к озону. Их насыщенная молекулярная структура обеспечивает стойкость к окислительному старению и воздействию атмосферных факторов, что особенно важно при длительной эксплуатации на открытом воздухе;

– силиконовые резины, сохраняющие эластичность при экстремально низких температурах. Благодаря высокой гибкости макромолекулярных цепей они способны работать в диапазоне температур, при которых другие эластомеры переходят в стеклообразное состояние;

– модифицированные бутадиеновые каучуки, свойства которых направленно изменяются за счёт введения специальных добавок и модификаторов, что позволяет расширить температурный диапазон работоспособности и повысить стойкость к циклическим нагрузкам.

Использование перечисленных материалов позволяет существенно снизить температуру стеклования резиновой матрицы и сохранить работоспособность ремня при отрицательных температурах. Тем самым обеспечивается возможность эффективной передачи механической энергии даже в условиях холодного пуска и последующей эксплуатации при низких температурах.

Армирующие элементы

В качестве корда в резинокордных приводных ремнях применяются полиэфирные волокна, арамидные нити и стекловолокно. Каждый из перечисленных материалов обладает собственным набором свойств, определяющим область его применения. Полиэфирные волокна характеризуются достаточной прочностью и умеренной стоимостью, однако их термостойкость и сопротивление усталостным разрушениям ограничены. Стекловолокно отличается высокой жёсткостью и стабильностью размеров, но при этом обладает пониженной эластичностью, что ограничивает его использование в условиях знакопеременных нагрузок.

Наиболее предпочтительными для эксплуатации в тяжёлых условиях, в том числе в арктических регионах, являются арамидные волокна. Они обладают высокой прочностью, устойчивостью к усталостным разрушениям и способностью сохранять несущую способность при многократном циклическом деформировании. Указанные свойства делают арамидный корд наиболее пригодным для применения в ремнях, работающих при низких температурах и повышенных нагрузках, поскольку именно усталостное разрушение корда представляет собой одну из основных причин отказа ременных передач.

Современные приводные ремни имеют многослойную структуру, каждый элемент которой выполняет строго определённую функцию. В общем случае конструкция включает:

– наружный защитный слой, предохраняющий ремень от воздействия внешней среды, влаги и механических повреждений;

– резиновую матрицу, обеспечивающую монолитность конструкции и передачу усилий между кордом и рабочими слоями;

– армирующий корд, воспринимающий основные тяговые нагрузки и определяющий прочностные характеристики ремня;

– внутренний рабочий слой, непосредственно контактирующий со шкивами и обеспечивающий передачу крутящего момента.

Дополнительно могут применяться защитные покрытия от влаги и льда, снижающие вероятность обледенения рабочих поверхностей, зубчатый профиль для повышения гибкости ремня и улучшения его огибающей способности, а также антифрикционные добавки, уменьшающие износ и тепловыделение в зоне контакта. Совокупность перечисленных решений позволяет повысить надёжность и ресурс ремня при эксплуатации в экстремальных климатических условиях.

Основные виды повреждений и отказов

В условиях Арктики наиболее распространены следующие виды повреждений резинокордных приводных ремней:

Трещинообразование возникает вследствие потери эластичности резины при низких температурах. Снижение подвижности макромолекулярных цепей приводит к тому, что материал утрачивает способность к релаксации напряжений, и под действием знакопеременных нагрузок в нём формируются микротрещины, постепенно укрупняющиеся в магистральные трещины.

Расслоение связано с нарушением адгезии между слоями конструкции. Различие коэффициентов термического расширения резины и корда, а также циклические температурные воздействия приводят к возникновению внутренних напряжений на границе раздела, что ослабляет связь между слоями и способствует их постепенному разделению.

Износ рабочей поверхности усиливается при пробуксовке, вызванной снижением коэффициента трения из-за обледенения. Дополнительное тепловыделение в зоне контакта ускоряет деградацию материала и приводит к неравномерному износу рабочих поверхностей.

Разрыв корда представляет собой наиболее опасный вид отказа, поскольку приводит к мгновенному выходу ремня из строя и потере работоспособности привода вспомогательных агрегатов. Данный вид отказа, как правило, становится результатом накопления усталостных повреждений и предшествующих дефектов.

Развитие повреждений носит прогрессирующий характер: первичные дефекты создают концентраторы напряжений, которые ускоряют образование вторичных повреждений. При несоблюдении режимов эксплуатации данный процесс существенно интенсифицируется [4].

Методы повышения надёжности. Повышение надёжности ременных передач в арктических условиях достигается за счёт комплекса мер, которые можно условно разделить на конструкторские, эксплуатационные и технологические.

Конструкторские методы предполагают применение морозостойких материалов, оптимизацию геометрии ремня с целью снижения локальных напряжений, а также использование защитных кожухов, предохраняющих ремень от прямого воздействия влаги, снега и ветра.

Эксплуатационные методы включают предварительный подогрев двигателя и агрегатов перед запуском, контроль натяжения ремня, регулярную проверку его состояния и снижение нагрузок в момент пуска. Соблюдение указанных мер позволяет уменьшить пиковые нагрузки и замедлить накопление повреждений.

Технологические методы предусматривают применение специальных пропиток корда, использование антиобледенительных покрытий и улучшение адгезии между слоями. Данные решения направлены на повышение стойкости ремня к неблагоприятным внешним воздействиям и увеличение его ресурса.

Методы диагностики состояния ремней

Своевременное выявление дефектов позволяет предотвратить аварийные ситуации и снизить риск внезапного отказа. К основным методам диагностики относятся:

– визуальный осмотр, позволяющий обнаружить трещины, расслоения и следы износа;

– контроль натяжения, необходимый для поддержания оптимальных условий работы передачи;

– вибрационный анализ, чувствительный к изменению динамических характеристик привода;

– тепловизионный контроль, выявляющий зоны локального перегрева, связанные с пробуксовкой;

– акустические методы, регистрирующие изменения спектра шума при появлении дефектов.

Современные подходы также предусматривают использование встроенных датчиков износа и систем мониторинга, позволяющих отслеживать состояние ремня в режиме реального времени и прогнозировать остаточный ресурс.

Перспективы развития

Одним из конструктивных решений, повышающих надёжность транспортного средства при эксплуатации в условиях больших отрицательных температур, является усиленная поперечина в передней части рамы, расположенная под вентилятором двигателя. Развитое крепление поперечин исключает образование концентраторов напряжений, которые возникают при сильном охлаждении и неравномерном тепловом сжатии элементов конструкции. Применение подобных решений уменьшает напряжение в материале при резких перепадах температуры и тем самым снижает вероятность появления трещин и деформаций в несущих элементах.

Перспективные направления исследований включают несколько взаимосвязанных направлений, каждое из которых направлено на повышение работоспособности ременных передач в экстремальных условиях:

– разработка наномодифицированных резиновых композиций, позволяющая целенаправленно изменять структуру материала на наноуровне и за счёт этого повышать его морозостойкость, прочность и сопротивление усталостному разрушению;

– создание самовосстанавливающихся материалов, способных восстанавливать целостность после образования микротрещин, что особенно важно при эксплуатации в условиях, где внешний ремонт затруднён;

– внедрение «умных» ремней с датчиками, обеспечивающих непрерывный мониторинг состояния ремня и позволяющих прогнозировать его остаточный ресурс;

– численное моделирование работы при экстремально низких температурах, дающее возможность оценивать поведение ремня под нагрузкой без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Развитие перечисленных технологий позволит существенно повысить надёжность и ресурс ременных передач в условиях Арктики, а также создаст предпосылки для формирования унифицированного семейства транспортных средств с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Выводы

Проведённый анализ показывает, что эксплуатация резинокордных приводных ремней в арктических условиях сопровождается воздействием комплекса неблагоприятных факторов, к числу которых относятся экстремально низкие температуры, обледенение, повышенная влажность и увеличенные нагрузки при запуске двигателя. Совокупное действие указанных факторов приводит к изменению физико-механических свойств материалов, ускоренному износу рабочих поверхностей и повышению вероятности отказов ременных передач.

Установлено, что надёжность ремней в таких условиях может быть обеспечена только при комплексном подходе, предполагающем одновременное решение задач на нескольких уровнях. К основным направлениям относятся:

– выбор морозостойких эластомеров и армирующих материалов, сохраняющих работоспособность при отрицательных температурах;

– совершенствование конструкции ремня, включая оптимизацию геометрии, применение защитных покрытий и повышение адгезии между слоями;

– соблюдение рациональных режимов эксплуатации, в том числе предварительный подогрев агрегатов и снижение нагрузок при пуске;

– своевременная диагностика состояния ремня с использованием современных методов контроля.

Внедрение современных технологий и материалов, включая наномодифицированные композиции, самовосстанавливающиеся материалы и «умные»

ремни с датчиками, открывает перспективы значительного увеличения срока службы ременных передач в экстремальных климатических условиях. Таким образом, решение рассмотренной научно-технической задачи непосредственно связано с повышением надёжности и эксплуатационной эффективности автомобильной техники, предназначенной для работы в Арктике.

Список литературы

1. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. М.: Стандартинформ, 2010. – URL: https://docs.cntd.ru (Дата обращения: 06.04.2026).

2. ГОСТ 7338-90. Пластины резиновые и резинотканевые. Техническое условия. – М.: Издательство стандартов, 1990. – URL: https://docs.cntd.ru (Дата обращения: 06.04.2026).

3. Поведение резиновых материалов в условиях Арктики // Полимерные материалы. – 2019-2024. – URL: https://polymerbranch.com (Дата обращения 06.04.2026).

4. Исследование свойств эластомеров при низких температурах // Трение и износ. – 2018-2023. – URL: https://journals.basnet.by (Дата обращения 06.04.2024).

5. Журавлёв, В.Н. Эксплуатация автомобильной техники в улосвиях Крайнего Севера. – М.: Транспорт, 1989. – 240 с.

6. Хрипченко, М. С. Проблемы использования нефтепродуктов в Арктике / М. С. Хрипченко, М. С. Лазебный, А. П. Новиков // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1(2). – С. 488-492. – EDNWZQUHE.

7. Гончаров, А. В. Выбор параметров системы охлаждения двигателей транспортно-технологических машин Арктики / А. В. Гончаров, А. А. Верховодов, М. С. Хрипченко // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1(2). – С. 359-362. – EDN SQXNBI.

References

1. GOST 15150-69. Machines, appliances, and other technical products. Designs for different climatic regions. Moscow: Standartinform, 2010. URL: https://docs.cntd.ru (Date of request: 04/06/2026).

2. GOST 7338-90. The plates are rubber and rubber-woven. Technical conditions. – M.: Publishing House of standards, 1990. – URL: https://docs.cntd.ru (Date of reference: 04/06/2026).

3. Behavior of rubber materials in Arctic conditions // Polymer materials. – 2019-2024. – URL: https://polymerbranch.com (Accessed 04/06/2026).

4. Investigation of the properties of elastomers at low temperatures // Friction and wear. – 2018-2023. – URL: https://journals .basnet.by (Accessed 04/06/2024).

5. Zhuravlev, V.N. Operation of automotive equipment in the territories of the Far North. Moscow: Transport, 1989. 240 p.

6. Khripchenko, M. S. Problems of using petroleum products in the Arctic / M. S. Khripchenko, M. S. Lazebny, A. P. Novikov // Arctic: innovative technologies, personnel, tourism. – 2020. – № 1(2). – Pp. 488-492. – EDNWZQUHE.

7. Goncharov, A.V. The choice of parameters of the cooling system for engines of transport and technological vehicles in the Arctic / A.V. Goncharov, A. A. Verkhovodov, M. S. Khripchenko // Arctic: innovative technologies, personnel, tourism. – 2020. – № 1(2). – Pp. 359-362. – EDN SQXNBI.

DOI: 10.58168/AutTraInd2026_166-175
УДК 378.004.12

Щеклеин Д.А.
преподаватель кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ
Гончарова О.И.
Зам. ген. директор ГК «Логус», РФ

Алименко И.А.
кандидат полит. наук,
ген. директор ГК «Логус», РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Shcheklein D.A.
Lecturer at the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation
Goncharova O.I.
Deputy General Director of "Logus" Group of Companies, Russian Federation
Alimenko I.A.
Candidate polit. science, General Director of Logus Group of Companies, Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

РОБОТЫ ДЛЯ УХОДА И СБОРА КЛУБНИКИ: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

ROBOTS FOR STRAWBERRY CARE AND HARVESTING: DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

Аннотация. В статье представлен мировой опыт разработки и создания сельскохозяйственных робототехнических средств для уборки клубники. Во всем мире сельхозтоваропроизводители акцентируют внимание на внедрение робототехнических комплексов для сбора клубники, поскольку такие комплексы позволяют экономить на расходах на рабочую силу. Показано, что создание таких роботов является технически сложной задачей. Для эффективной работы при сборе урожая роботы оснащают техническим зрениям и искусственным интеллектом, что позволяет производить сбор спелых ягод. Однако, в настоящее время стоимость сельскохозяйственных роботов остается высокой.

Abstract. The article presents the world experience in the development and creation of agricultural robotic tools for harvesting strawberries. All over the world, agricultural producers are focusing on the introduction of robotic complexes for harvesting strawberries, since such complexes allow them to save on labor costs. It is shown that the creation of such robots is a technically challenging task. To work effectively during harvesting, robots are equipped with technical vision and artificial intelligence, which allows them to harvest ripe berries. However, currently the cost of agricultural robots remains high.

Ключевые слова: клубника, сельскохозяйственные роботы, нейросеть, искусственный интеллект, новые технологии.

Keywords: strawberries, agricultural robots, neural network, artificial intelligence, new technologies.

© Щеклеин Д. А., Гончарова О. И., Алименко И. А., Прядкин В. И., 2026

Введение

Мировой рынок клубники, оцениваемый примерно в $20 млрд, по прогнозам, будет ежегодно расти на 6% в течение следующего десятилетия. Нехватка рабочей силы продолжает оказывать давление на сектор, что приводит к росту издержек и потенциальным ограничениям поставок [1,2].

Уборка клубники – это трудоемкий процесс, который требует привлечения большого штата сотрудников. По данным Бюро по исследованию инноваций в малом бизнесе, сельскохозяйственные компании затрачивают по миллиарду долларов в год на оплату труда сборщиков сельхозпродукции, поэтому интерес к механизации этого процесса очень высок [3,4].

Решать эту проблему можно с помощью новых технологий. Роботизированные системы, предназначенные для сельскохозяйственных работ, привлекают повышенный интерес, это перспективное направление, поскольку такие системы позволяют экономить на расходах на рабочую силу. И здесь наиболее перспективным направлением является использование нейросетей и искусственного интеллекта для создания сельскохозяйственных роботов и систем контроля урожая [5,6].

Главная цель создания роботов для клубники – это механизировать технологический процесс сбора урожая, который позволит обеспечить правильный уход за клубникой и избежать потери.

Клубнику выращивают как в открытом грунте, так и в теплицах. Но ягоду мало вырастить, её нужно ещё и собрать.

Для сбора клубники, выращиваемой в открытом грунте, применяют роботы на мобильных платформах различного конструктивного исполнения. Так, уборочный робот Q2, предназначенный для сбора клубники, выращенной в полевых условиях, имеет два роботизированных манипулятора и мягкие захваты, которые аккуратно собирают плоды и помещают их в контейнеры (рис. 1). Производительность робота на поле составляет около 50 кг/час, робот движется по делянке со скоростью до 30 кг/час. Один оператор может управлять 8 роботами, при этом робот Q2 упаковывает клубнику прямо в лотки, что легко вписывается в существующие рабочие процессы фермы.

Робот, работающий от аккумуляторных батарей, предназначен для грядок шириной 67–140 см и выполняет как сбор урожая, так и встроенную сортировку по качеству. Каждая ягода сканируется и оценивается системой распознавания, которая классифицирует размер, дефекты поверхности, зрелость цвета и перезрелость, а затем манипулятор помещает ее в соответствующий контейнер

или лоток. Этот замкнутый процесс обеспечивает равномерное качество упаковки прямо на поле. Поскольку клубника часто скрыта под листьями, имеется динамическая система распознавания, которая может искать клубнику, так как манипулятор с камерой проникает в крону.



Рисунок 1 – Уборочный робот Q2 для сбора клубники в полевых условиях

Ученые из университета штата Вашингтон (WSU) разработали и протестировала роботизированный комбайн WSU для выращивания клубники в открытом грунте (рис. 2).



Рисунок 2 – Комбайн WSU для сбора клубники в открытом грунте

Комбайн WSU представляет собой четырехколесную тележку, на которой установлена роботизированная платформа и компьютерная система, расположенная над рядами клубники. В его системе видеонаблюдения используется 3D-камера, которая позволяет получать как цветные, так и объемные изображения. Система сочетает в себе визуальную платформу с искусственным интеллектом, силиконовые захваты и систему вентиляторов, которая отодвигает листья в сторону, чтобы получить доступ к спрятанным ягодам.

Лабораторные и полевые испытания показали, что комбайн правильно распознает клубнику в 80% случаев и в 93% случаев определяет, спрятаны ли ягоды. Роботизированный сбор урожая изучается давно, но выявление ягод, скрытых под листьями, остается сложной задачей для систем, работающих в открытом грунте. Благодаря системе вентиляторов эффективность уборки повысилась: было собрано 74% спелых плодов по сравнению с 58% без вентиляторов. В среднем роботу требовалось 20 секунд, чтобы определить и собрать ягоду при использовании вентиляторной системы.

В Испании создан робота Agrobot E-Series. Это автономный сборщик клубники на беспроводном управлении, состоящий из 24 роботизированных манипуляторов, которые могут определить спелость, размер и форму плодов при помощи сенсоров (рис. 3).

Роботу Agrobot E-Series не нужен оператор для управления, поэтому он может работать и днем, и ночью в течение всей недели. Робот собирает ягоды бесконтактным способом: манипуляторы захватывают и аккуратно подрезают стебли, а затем помещают собранные ягоды в упаковочные контейнеры.



Рисунок 3 – Робот Agrobot E-Series для сбора клубники в открытом грунте

Автономный робот-комбайн поможет решить проблемы, связанные с уборкой урожая в открытом грунте. Он способен убирать ягоды при 2-х и 4-х рядной системах возделывания, свободно перемещаясь по зоне выращивания.

Бельгийские инженеры создали мобильного робота для сбора клубники в закрытом грунте. Инженерная компания «Octinion» создала робота-сборщика клубники. Основной элемент, который помогает роботу трудиться быстро и эффективно благодаря специальному захвату, напечатанному на 3D-принтере. Главной задачей, которая стояла перед инженерами, заключалась в максимальной сохранности плодов. Специалисты разработали мягкую «руку», она может равномерно распределять давление по всей поверхности фруктов (рис. 4).



Рисунок 4 – Робот Octinion для сбора клубники в закрытом грунте

Робот Octinion работает в автономном режиме, перемещаясь по теплицам с помощью навигационных маркеров. Робот «Octinion» использует алгоритмы интеллектуального машинного зрения, чтобы определить, когда клубника созрела и готова к сбору. Нацелившись на сочную ягодку, робот протягивает специально сконструированную руку и срывает плод с помощью кастомизированного хвата. Трехмерный печатный захват удаляет плод, не повреждая его. Обладая умными алгоритмами машинного зрения и уникально сделанной «рукой», он собирает клубнику лучше, чем человек.

Робот «Octinion» полностью автономный роботизированный сборщик клубники. Он может самостоятельно передвигаться по точному маршруту, при этом точность может определяться вплоть до сантиметров. Исследователям удалось создать устройство, которое обеспечивает ловкость и аккуратностью

движений. Для распознания спелых плодов алгоритм имеет специальную систему компьютерного зрения с искусственным интеллектом распознания спелых ягод для сбора.

Эффективность и скорость работы робота «Octinion» достаточно высокая, он собирает спелые плоды каждые пять секунд. У опытного рабочего уходит примерно три секунды, чтобы бережно сорвать ягоду и уложить ее в контейнер. При этом робот выполняет свое задание с большей осторожностью и аккуратностью. Около 70% собранных ягод не имеют каких-либо признаков повреждений, что совпадает со статистикой обычной сборки урожая людьми. Режим работы робота может быть бесперебойным, 24 часа 7 дней в неделю.

Разработчики робота «Octinion» столкнулись с еще одной существенной проблемой – необходимостью захвата клубники без кусочков зелени и растений, к которым она прикреплена. С этой целью сделали стабилизацию захвата с поворотом руки на 90 градусов. Благодаря этому клубника попадает в корзину очищенной (рис. 5).



Рисунок 5 – Корзинки с очищенной клубникой

Сельхозтоваропроизводители Великобритании столкнулись с проблемой нехватка работников, занятых неквалифицированным трудом, в частности, уборкой клубники. Решить ее взялись инженеры-робототехники Университета Эссекса совместно со специалистами компании Jam Wilkin & Sons of Tiptree, известного производителя джема, повидла и других связанных с ними продуктов.

В рамках проекта, финансируемого за счет гранта в размере 1,02 млн фунтов стерлингов по флагманской Программе сельскохозяйственных иннова-

ций Британского министерства окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства, недорогому роботу было поручено собирать клубнику на одной из вертикальных ферм. Существующие роботы для сбора урожая стоят в среднем около 150 000 фунтов стерлингов, но в случае успеха новый прототип будет стоить лишь часть этой цены — около 10 000 фунтов стерлингов.

Флагманская программа правительства по сельскохозяйственным инновациям направлена на поддержку амбициозных проектов по повышению производительности и повышению экологической устойчивости в сельскохозяйственном и садоводческом секторах Англии, одновременно приближая эти сектора к нулевым показателям выбросов.

Перед разработчиками была поставлена задача - создание робота, способного заменить сборщиков ягод. При этом роботы должны трудиться в естественной неструктурированной среде вместе с людьми. Они должны уметь осторожно без повреждений снимать ягоды с кустов, определять их размер, степень зрелости, отбраковывать больные плоды и, что не менее важно, работать в любую погоду. Роботы должны не только собирать, но и упаковывать клубнику за считанные секунды и которые стоят в разы меньше существующих технологий (рис. 6).

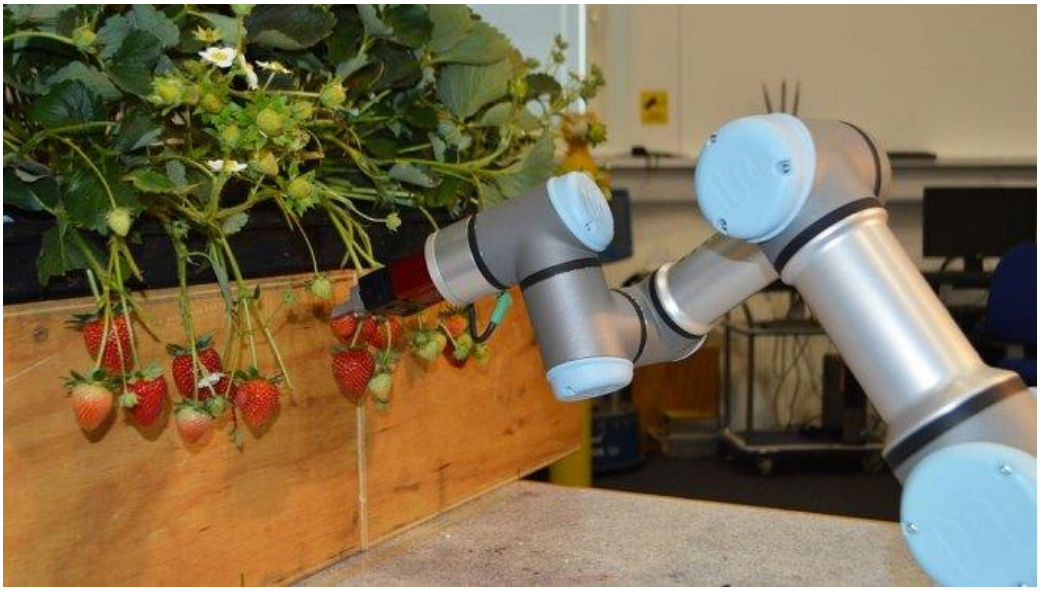


Рисунок 6 – Робот для сбора клубники в закрытом грунте

Реализация проекта позволит более эффективно выращивать продукты питания с помощью робототехники и искусственного интеллекта, и сделать современные технологии агроробототехники доступными для всех. При этом даже небольшие фермы и предприятия могли позволить себе приобретения робо-

тов и изменить ситуацию, поэтому жизненно важно найти экономически эффективные альтернативы, чтобы помочь сельскохозяйственной отрасли. В то же время робототехника — это фактор, который меняет правила игры и решает из важнейших проблем, с которыми сталкивается отрасль — продовольственная безопасность, безопасность труда, климат и энергетика.

Робот, должен собрать клубнику всего за 2,5 секунды, основан на предыдущем прототипе, который успешно испытывался в течение последних двух сезонов.

При промышленном выращивании ягод в России по-прежнему используют преимущественно ручной труд. Однако, наращивание площадей и дефицит рабочей силы способствует увеличению роли механизации и автоматизации в садоводстве. Ягодные компании находят помощников не только среди агрокомбайнов, но и внедряют в отрасль обучаемых роботов [5,6].

Для новых высокотехнологичных садов разрабатываются новые машины и агрегаты. Так, ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ» и компания «КБ Аврора» разработали многофункциональное робототехническое беспилотное средство «Робтрак ВИМ 0,6 (0,9) – 36». Устройство способно выполнять несколько целевых технологических операций, в том числе химическую обработку, внесение органических удобрений в приствольные зоны плодовых насаждений. Кроме того, для беспилотного агрегата уже создан специальный универсальный технологический адаптер для магнитно-импульсной обработки растений, предназначенный для стимуляции жизненных и ростовых процессов садовых растений (рис. 7) [2].



Рисунок 7 – Полевой робот «Элеком 2.0»

В России исследователями ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ» так же был разработан беспилотный робот для сбора клубники, он имеет колесное шасси (рис. 8).



Рисунок 8 – Робот для сбора клубники

Сбор спелых плодов производится рукой, имеющей специальный захват. Проведенные испытания опытного образца показали его высокую эффективность.

Заключение

1. Внедрение робототехнических комплексов для сбора клубники является перспективным направлением во всем мире, поскольку такие комплексы позволяют решить проблему нехватки кадров в аграрном комплексе и экономить средства на рабочую силу.

2. Создание робототехнических комплексов для сбора клубники является технически сложной задачей. Распознание спелой клубники при помощи технического зрения требует широкого применения нейросетей и искусственного интеллекта, вследствие чего существенно возрастает стоимость данных комплексов.

3. Разработанные различные варианты роботов показали высокую эффективность в сравнении с ручной сборкой, однако стоимость этих роботов остается высокой и недоступной широкому кругу фермеров.

Список литературы

1. Черноиванов, В. И. Новые подходы к интеллектуализации самоходной техники / В. И. Черноиванов, Г. К. Толоконников // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 7. – С. 2-6. – EDN UCBRBX.

2. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника нового поколения / И. А. Рогов, В. И. Черноиванов, Ю. А. Иванов, Г. К. Толоконников, Е. Б. Петров, И. М. Волкова // Вестник ВНИИМЖ, Приложение к № 3(15). – 2014 (2). – С. 3-65.

3. Черноиванов, В. И. Интеллектуальная сельскохозяйственная техника / В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский, В. Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 124 с.

4. Лобачевский, Я. П. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства / Я. П. Лобачевский, А. С. Дорохов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – № 15(4). – С. 6-10.

5. Федоренко, В. Ф. Интеллектуальные системы в сельском хозяйстве: науч. аналит. обзор / В. Ф. Федоренко, В. Я. Гольтяпин, Л. М. Колчина. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – 156 с.

6. Средства автоматизации для управления сельскохозяйственной техникой / А. Ю. Измайлов, В. К. Хорошенков, В. А. Колесникова, И. С. Алексеев, С. Э. Лонин, Н. Т. Гончаров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 3. – С. 3-9.

References

1. Chernoivanov, V. I. New Approaches to the Intellectualization of Self-Propelled Equipment / V. I. Chernoivanov, G. K. Tolokonnikov // Equipment and Machinery for Rural Areas. – 2015. – No. 7. – Pp. 2–6. – EDN UCBRBX.

2. Intellectual agricultural machinery of the new generation / I. A. Rogov, V. I. Chernoivanov, Yu. A. Ivanov, G. K. Tolokonnikov, A. B. Petrov, I. M. Volkova // Bulletin of VNIIMZH, Appendix to № 3(15). – 2014 (2). – Pp. 3-65.

3. Chernoivanov, V. I. Intellectual agricultural machinery / V. I. Chernoivanov, A. A. Yezhevsky, V. F. Fedorenko. – Moscow: "Rosinformagrotech", 2014. – 124 p.

4. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic technical means for agriculture / Ya. P. Lobachevsky, A. S. Dorokhov // Agricultural machinery and technology. – 2021. – No. 15(4). – pp.6-10.

5. Fedorenko, V. F. Intelligent systems in agriculture: scientific the analyte Review // V. F. Fedorenko, V. Ya. Goltyapin, L. M. Kolchina. - M.: FSBI "Rosinformagrotech", 2017. – 156 p.

6. Automation tools for controlling agricultural machinery / A. Yu. Izmailov, V. K. Khoroshenkov, V. A. Kolesnikova, I. S. Alekseev, S. E. Lonin, N. T. Goncharov // Agricultural machinery and technologies. – 2017. – No. 3. – pp. 3-9.

Научное издание

ИННОВАЦИИ В АВТОТРАКТОРНОЙ ОТРАСЛИ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы Всероссийской студенческой научной конференции

Воронеж, 15 апреля 2026 г.

Ответственный редактор В. И. Прядкин

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 30.10.2026. Объем данных 17,9 Мб
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8