

**Информационно – справочный материал
о существующих технических решениях применения СПГ
для железнодорожного транспорта**



ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ I. Опыт развития производства железнодорожного транспорта на газомоторном топливе	3
1. Мировой опыт развития производства железнодорожного транспорта на газомоторном топливе.....	3
2. Российский опыт развития производства железнодорожного транспорта на газомоторном топливе.....	9
РАЗДЕЛ II. Технические особенности железнодорожного транспорта на газомоторном топливе российского производства	17
1. Магистральные газотурбовозы на сжиженном природном газе.....	17
1.1. Газотурбовозы ГТ1h-001 и ГТ1h-002.....	17
1.2. Опыт эксплуатации газотурбовозов ГТ1h-001 и ГТ1h-002.....	22
2. Маневровые тепловозы.....	27
2.1. Маневровый тепловоз на сжиженном природном газе.....	27
2.2. Опыт эксплуатации маневрового тепловоза ТЭМ19 на СПГ.....	30
3. Технические решения для перевозки, хранения и заправки СПГ.....	31
3.1. Вагоны-цистерны для перевозки и хранения СПГ.....	31
3.2. Технические решения для заправки железнодорожного транспорта сжиженным природным газом.....	35
4. Новые разработки моделей железнодорожного транспорта на сжиженном природном газе.....	38
4.1. Маневровые локомотивы производства АО «Синара транспортные машины».....	39
4.2. Маневровые локомотивы производства ЗАО «Трансмашхолдинг».....	43

РАЗДЕЛ I. ОПЫТ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ГАЗОМОТОРНОМ ТОПЛИВЕ.

1. Мировой опыт развития производства железнодорожного транспорта на газомоторном топливе.

История создания локомотивов на газе (с газотурбинным или газопоршневым двигателем) началась в конце 1930-х годов. В 1937 г. американская компания Plymouth Locomotive Works представила опытный образец газопоршневого локомотива (рис.1), а в 1938 г. в Швейцарии компанией Brown, Boveri & Cie был построен первый газотурбовоз - Am 4/6 1101.

В течение 1940-60-х гг. свои модели газотурбовозов разрабатывали многие мировые производители железнодорожной техники: американская компания General Electric, французская ANF (сейчас подразделение Bombardier), британская English Electric, немецкая Klockner-Humboldt-Deutz (ныне часть корпорации Rolls-Royce).



Рисунок 1. Экспериментальный локомотив Plymouth ML с газопоршневым двигателем, сейчас экспонат Музея транспорта в г. Кирквуд, штат Миссури, США

Вместе с тем, широкому распространению газотурбовозов препятствовали следующие факторы:

1. В образцах, где в качестве топлива использовался относительно дешёвый судовый мазут, турбины быстро загрязнялись и требовали ремонта. В связи с этим значительно возростала стоимость эксплуатации локомотивов. Такие проблемы возникли у General Electric (UP50-UP60, 1948-1953 гг.), произведенных для оператора Union Pacific, и локомотива British Rail 18000 (1949 г., производство Brown, Boveri & Cie).

2. Низкий КПД, особенно при малой нагрузке, привели к постепенному вытеснению газотурбовозов более эффективными дизельными тепловозами.

Максимальный КПД газотурбовоза Am 4/6 1101 (1938 г., производство Brown, Boveri & Cie для швейцарского оператора SBB-CFF-FFS) составлял всего 18% при выходной мощности 1700 л.с. Газотурбовоз British Rail 18100 (1951 г., производство Metropolitan Vickers) был спроектирован для работы на авиационном керосине, что заметно увеличивало затраты на топливо. Локомотив эксплуатировался до 1958 г. и позже был переделан в электровоз. Довольно быстро, к 1970 г., были списаны все локомотивы UP61-UP75 (1954-1958 гг.) и газотурбовозы третьего поколения № 1— № 30 (1958-1961 гг.), производства General Electric. Кроме низкой эффективности газотурбинные двигатели также отличались высоким уровнем шума.

GT3 от English Electric, построенный в 1961 г. для British Railways, после года испытаний был возвращён оператором на завод, вместо него в эксплуатацию были взяты тепловозы с электропередачей.

В 1970-1971 гг. компания Krupp установила газовые турбины на восемь тепловозов Class 210. Машины поступили в эксплуатацию Deutsche Bundesbahn. Турбина на локомотивах включалась только при разгоне свыше 25 км/ч, а также на подъемах. Частое включение/выключение приводило к ускоренному износу турбин и требовало более частого ремонта. В 1980-1981 гг. в ходе модернизации турбины были сняты со всех локомотивов.

3. Нефтяной кризис 1973 г. привел к резкому росту цен на топливо. Некоторые страны, в том числе Франция, электрифицировали свои железные дороги. Из-за этого не был реализован проект высокоскоростного пассажирского движения с использованием газотурбовоза TGV 001 (1969 г., производство Alstom).

В США эксперименты по использованию газа в качестве топлива для локомотивов проводились регулярно со времен первых образцов General Electric в 1950-х. Несколько проектов было реализовано в конце 1980-х– начале 1990-х гг.

Железнодорожный оператор компания «Burlington Northern», «Air Products and Chemicals» и «Energy Conversions Inc.» переоборудовали два тепловоза для работы на природном газе. Компания «Air Products and Chemicals» разработала схему размещения заправочных станций с использованием 2 емкостей вместимостью 25 000 галлонов каждая для хранения СПГ, которые были построены в г. Стэйплс, штат Миннесота. Двигатели работали на дизельном топливе на низких оборотах, впрыск газа начинался с 3-го уровня и увеличивался до 95% на 8-м уровне. Данные тепловозы использовались при перевозке грузов на полуострове Olympic, а далее на перевозках угля из Вайоминга в Миннесоту и Висконсин в течение 4 лет.

Компания «Union Pacific» проводила отдельные программы исследований и разработок с компаниями «Electro-Motive Diesel (EMD)» и «GE Transportation Systems (GE)» по использованию природного газа для двигателей мощных магистральных локомотивов. «Union Pacific» модифицировала два новых локомотива EMD SD60M (мощностью 3800 л.с.) для работы в двухтопливном и дизельном режимах. Аналогичным образом компания «Union Pacific» модифицировала два новых локомотива GE Dash-8 (мощностью 4100 л.с.). В результате использования данных установок происходило сокращение выбросов в районе Лос-Анджелеса в течение 20 лет. Среди выявленных у них проблем: неполадки в криогенных насосах, в программном обеспечении систем управления двигателем и топливным режимом, утечки топлива.

В 1993 г. компания MK Rail Corporation модернизировала маневровый локомотив для работы на СПГ, но при этом его мощность снизилась на 33%. Кроме того, большинство опытных образцов тех лет уступали по показателям выбросов вредных веществ в атмосферу тепловозам, взятым за их основу.

Тем не менее, разработки по газовым локомотивам не были прекращены, и к настоящему времени в них наметился прогресс. В 2013 г. крупнейшие ж/д операторы США и Канады — BNSF, Union Pacific, Norfolk Southern, Canadian National – объявили о готовности к испытанию новинок от GE Transportation и EMD Caterpillar (рис.2), которые, по заявлениям производителей, должны снизить эксплуатационные издержки и выбросы парниковых газов.



Рисунок 2. Локомотивы на СПГ

Компания «BNSF» в 2013 году проводила испытание шести локомотивов, работающих на природном газе, (три локомотива «Caterpillar» и три локомотива «GE»). Далее планировалось принять решение о переводе парка, состоящего примерно из 7000 локомотивов, на СПГ.

Компания «CSX» и «GE Transportation» объединили свои усилия для изучения технологии СПГ для локомотивов. Пилотная программа стартовала в 2014 году с использования локомотива серии Evolution, оснащенного оборудованием GE's Next Fuel Natural Gas Retrofit Kit (рис.3), соответствующего американским стандартам выбросов EPA Tier 3, которая позволяет заместить до

80% потребляемого дизельного топлива сжиженным природным газом, при этом данный локомотив может работать и полностью на дизельном топливе. Мощность локомотива ES44AC составляет 6560 кВт.

В ноябре 2017 года компания Florida East Coast Railway начала программу переоборудования для работы на СПГ своего подвижного состава из 24 локомотивов, что сделало ее первой североамериканской железнодорожной компанией, эксплуатирующей весь парк на природном газе.



Рисунок 3. Локомотив на СПГ GE ES44ACs

Топливная система СПГ была разработана компанией «Chart» на базе 40-футового криогенного танк-контейнера (рис.4), которая позволяет иметь запас хода при полной нагрузке до 900 миль при максимальной скорости 60 миль в час, что достаточно для поездки по маршруту Джексонвилл - Майами и обратно на одной заправке.



Рисунок 4. Топливная система локомотива на СПГ GE ES44ACs

Компания «Canadian National Railway» с 2012 года по настоящее время испытывает технологию ЕСІ на двух магистральных дизель-электрических локомотивах, работающих на СПГ, между Эдмонтоном и Фортом МакМюррей. Модернизированные локомотивы используют 90% природного газа и 10%

дизельного топлива. Топливная система СПГ была изготовлена компанией «Chart», СПГ поставляется компанией «Encana».

С 2013 года по настоящее время Компании «Canadian National Railway», «Electro-Motive Diesel (EMD)», «Westport Innovations» и «Gaz Métro Transport Solutions» разработали локомотив СПГ и стандартизированную топливную систему СПГ. «Canadian National» предоставила два локомотива мощностью 4300 л.с., «EMD» обеспечила преобразование двигателя для работы на природном газе, используя технологии прямого впрыска высокого давления Westport Innovations high-pressure direct injection (HPDI), которая позволяет заместить до 95% дизельного топлива природным газом, и топливную систему СПГ. В качестве СПГ-емкости используется стандартный 40-футовый ISO контейнер для сжиженного природного газа вместимостью 10 000 галлонов, поставляемый компанией «INOxSVA». Лабораторные испытания были проведены в 2013 году, а первый локомотив был продемонстрирован в 2014 году в рамках программы совместного консорциума, финансируемой компанией «Sustainable Technology Development Canada» (рис.5). Мощность тепловоза SD70M составляет 6400 кВт.



Рисунок 5. Локомотив на СПГ компании «Canadian National Railway»

Бразилия с 2010 г. по настоящее время переоборудовала три локомотива для работы на природном газе, чтобы заменить до 50% дизельного топлива. Локомотивы работают на грузовой железнодорожной линии «Vale Vitoria-Minas Railroad».

Чешская компания АО «ВИТКОВИЦЕ Транспорт» изготовила два газовых тепловоза на компримированном природном газе (КПГ) мощностью 250 кВт и 500 кВт (2x250) с двигателями TEDOM, способными развивать максимальную скорость до 40 км/ч и до 90 км/ч соответственно и средним расходом 7,5 м³ и 14 м³ КПГ в час.



Рисунок 6. Локомотив на КПГ компании АО «ВИТКОВИЦЕ Транспорт»

Основным недостатком является небольшой запас топлива и, как следствие, снижение максимального пробега и интервала между заправками по сравнению с дизельным вариантом до 1000 км и 36 часов против 5500 км и 163 часов. С целью возможности нормальной эксплуатации появилась необходимость строительства в депо заправочной станции КПГ (рис.7).



Рисунок 7. Заправка локомотива на КПГ компании АО «ВИТКОВИЦЕ Транспорт»

В ноябре 2012 года индийские железные дороги объявили международный тендер на поставку газотурбинных электровозов. Исследовательская проектно-конструкторская организация индийских железных дорог (RDSO) и научно-исследовательское подразделение министерства железных дорог, базирующееся в Лакхнау, работают над производством прототипа локомотива, работающего на СПГ.

2. Российский опыт развития производства железнодорожного транспорта на газомоторном топливе.

Разработка тепловозов на газомоторном топливе началась еще в СССР в конце 1950-х годов. В 1959 году Коломенский завод произвел грузовой локомотив Г1-01 мощностью 3500 л. с., а в 1963 г. – принято решение о постройке двух газотурбовозов ГП1 на базе ТЭП60 с сохранением габарита, без изменений тележек, мощностью 3000 л.с. В 1964 г. – пассажирские газотурбовозы ГП1-0001 (рис.8) и ГП1-0002 после доводочных испытаний были направлены в локомотивное депо Льгов Московской железной дороги для опытной эксплуатации. За период эксплуатации пассажирские ГП1 прошли около 600 тыс. км. Парадоксально, но, несмотря на работу мощной турбины ГП-3,5, уровень шума в кабине машиниста был ниже, чем у других локомотивов, эксплуатируемых в СССР в те годы. Однако, вместо дальнейшего развития технологии газотурбовозов руководством завода и Министерством тяжелого машиностроения СССР было принято решение приостановить проект, поэтому в 1974 г. оба газотурбовоза были выведены из эксплуатации из-за отсутствия запасных частей.

Ещё один советский газотурбовоз – ГТ101-001 – был изготовлен в 1960 г. Луганским тепловозостроительным заводом со свободнопоршневым генератором газов, однако, из-за возникших проблем в системе гидравлических преобразователей так и не поступил в эксплуатацию.



Рисунок 8. Газотурбовоз ГП1-0001

	№ 18100 Metropolitan – Vicker Electrical Company	Газотурбовоз фирмы Westinghouse	ГТ №50 General Electric, «Alko»	ГТ 6250 кВт General Electric, «Alko»	Г1 Коломенский завод	ГП1 Коломенский завод	Г101 Луганский завод
Год постройки	1950 г.	1955 г.	1948 г.	1958-61 г.	1959 г.	1964 г.	1960 г.
Построено	1 ед.	1 ед.	25 ед.	30 ед.	1 ед.	2 ед.	1 ед.
Срок службы	-	-	12 лет	15 лет	15 лет	10 лет	Не прошел испытания
Назначение	Пасс.	Пасс.	Груз.	Груз.	Груз.	Пасс.	Груз.
Осевая формула	3 ₀ -3 ₀	2 ₀ +2 ₀ -2 ₀ +2 ₀	2 ₀ +2 ₀ - 2 ₀ +2 ₀	2х(3 ₀ +3 ₀)	3 ₀ -3 ₀	3 ₀ -3 ₀	3 ₀ -3 ₀
Двигатель	ГТД	2 ГТД	Одноваль ный ГТД	Одноваль ный ГТД	ГТД ГТ-3,5	ГТД ГТ-3,5	ГТД БМЗ
Передача	электрич.	электрич.	электрич.	электрич.	электрич.	электрич.	гидравлич.
Мощность	2574 кВт	2950 кВт	3300 кВт	6250 кВт	2570 кВт	2570 кВт	2208 кВт
Констр. скорость	145 км/ч	160 км/ч	105 км/ч	105 км/ч	100 км/ч	160 км/ч	100 км/ч
Причины прекращения эксплуатации	Высокий расход топлива, низкая надежность		Окончание планируемого срока эксплуатации, замена более современными локомотивами		Сворачивание программы производства газотурбовозов а СССР		Конструк. недоработки, в эксплуатацию не поступил

Таблица 1. Сравнительные результаты эксплуатации первых газотурбовозов, работающих на газомоторном топливе.

Программа в области использования природного газа на железнодорожном транспорте продолжилась в 80-х гг. XX в., и в 1987 году на Луганском тепловозостроительном заводе были построены три опытных магистральных газодизельных тепловоза: два ТЭ10Г и один 2ТЭ116Г. Каждый из этих локомотивов состоял из двух тяговых секций и тендера с двумя криогенными емкостями производства «Криогенмаш» для размещения сжиженного природного газа. На тепловозах 2ТЭ10Г в качестве силового агрегата был применен двухтактный газодизельный двигатель типа 10Д100 производства Харьковского завода, а на тепловозе 2ТЭ116Г - четырехтактный дизельный двигатель типа Д49 производства Коломенского завода. Испытания этих газовых тепловозов показали, что требуется доводка газодизелей обеих серий. Был выявлен и ряд недостатков в конструкции криогенного тендера. В последующие годы работы по магистральным газовым тепловозам были законсервированы и возобновлены только в 1999 г. Во ВНИИЖТ, на Коломенском заводе и во ВНИТИ была осуществлена доводка газодизельного двигателя тепловоза 2ТЭ116Г. На этом тепловозе в качестве силовых агрегатов были применены газодизельные генераторы ГДГ-1 (дизель 16ЧН26/26), работающие по газодизельному циклу с подачей запальной порции дизельного топлива. В тендерной секции были расположены два криогенных резервуара для размещения 17 т сжиженного природного газа (СПГ), оборудование для регулирования в них давления, испаритель, устройства для регулирования подачи газа в обе тяговые секции для наполнения и слива газа, приборы защиты

и контроля. Газификация СПГ для подачи в тяговые секции осуществлялась за счет тепла наружного воздуха и охлаждающей воды газодизеля, подаваемой в газоводяной теплообменник дополнительным водяным насосом. Основные проектные характеристики газового тепловоза: масса криогенной секции 88 т, запас в ней сжиженного газа 17 т, запальная порция дизельного топлива 15% от общего расхода. Секционная мощность 2250 кВт, так же, как и на серийном тепловозе 2ТЭ116.

Современная история развития производства и использования магистральных газотурбовозов началась в конце 2006 года, когда ОАО "Российские железные дороги" (РЖД) совместно с научно-техническим комплексом «Кузнецов» в Самаре разместило заказ на разработку и создание опытного двигателя для газотурбовоза-электровоза (ГТЭЛ), работающего на СПГ, и уже в 2008 году был разработан первый в России магистральный газотурбинный локомотив (газотурбовоз) ГТ1-001, мощностью 8300кВт (более 11000 лошадиных сил) (рис.9).



Рисунок 9. Газотурбовоз ГТ1-001

Это двухсекционный локомотив, в первой секции (тяговой) которого размещается оборудование силового блока (газотурбинный двигатель, тяговый генератор и их вспомогательные системы), вспомогательное оборудование, оборудование системы газоподготовки и системы подготовки воздуха. Во второй секции (бустерной) находятся криогенная емкость с запасом СПГ в объеме 17 т, тягово-энергетическое оборудование и оборудование системы газоподготовки.

В 2008 г. на Московской железной дороге состоялись первые опытные поездки газотурбовоза ГТ1-001, в результате которых на участке Рыбное – Бекасово проведены поезда массой до 8300 т, что значительно превысило установленные весовые нормы для данного участка. На экспериментальном кольце ВНИИЖТ (Щербинка) 23 января 2009 г. газотурбовозом проведен грузовой поезд массой 15020 т. Это мировой рекорд для одного автономного локомотива с одной силовой установкой, что подтверждается Дипломом Книги рекордов Гиннеса за создание самого мощного в мире магистрального газотурбовоза, работающего на сжиженном природном газе.

Подконтрольная эксплуатация магистрального газотурбовоза ГТ1-001 на Московской железной дороге подтвердила заявленные технико-экономические параметры локомотива и его эффективность. После завершения первого этапа испытаний газотурбовоз был передислоцирован на Свердловскую железную дорогу для продолжения подконтрольной эксплуатации. Заправка газотурбовоза СПГ осуществляется ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» на газораспределительной станции ГРС-4 (станция Аппаратная, Свердловской железной дороги). На участке Березит – Алапаевск Свердловской железной дороги газотурбовозом ГТ1-001 проведен поезд массой 9000 т.

В 2011 году началась модернизация локомотива ГТ1-001 с исключением расхода дизельного топлива (на вспомогательные нужды) и использованием накопителей энергии для питания вспомогательных систем и маневрового режима с присвоением обозначения ГТh-001.

С октября 2013 года на базе депо Егоршино эксплуатируется первый магистральный газотурбовоз ГТ1h-001. Он успешно водит поезда (в том числе повышенного веса и длины) на участке Егоршино – Алапаевск – Серов-Сортировочный.

В 2013 г. был построен новый газотурбовоз ГТ1h-002 (рис. 10) на базе другой экипажной части (тепловоза ТЭМ7А) и с модернизированным оборудованием. ГТ1h-002 – грузовой газотурбовоз с электропередачей переменного-постоянного тока с поосным регулированием тяги в составе двух 8-осных секций. Одна секция содержит газовую турбину, поставляемую научно-техническим комплексом «Кузнецов», которая приводит в движение электрогенератор привода ЭТМ, а вторая секция содержит резервуары для СПГ, поставляемые «Уралкриомашем», и топливные системы от «Криомаш-БЗКМ». Газотурбовоз ГТ1h-002 предназначен для вождения грузовых поездов весом свыше 6000 т на сети железных дорог колеи 1520 мм. Запас сжиженного природного газа газотурбовоза ГТ1h-002 увеличен до 20 т. Является первым предсерийным магистральным газотурбовозом. Газотурбовоз не имеет аналогов

в мире, мощность энергетической установки, работающей на СПГ, составляет 8500 кВт.



Рисунок 10. Газотурбовоз ГТ1h-002

В настоящее время газотурбовоз ГТ1h-002 проходит подконтрольную эксплуатацию на Свердловской железной дороге. Анализ поездок газотурбовоза ГТ1h-002 на полигоне Егоршино – Серов-сорт. – Егоршино общей протяженностью 640 км и имеющем тяжелый профиль, показывает средний расход газа за поездку в районе 15 - 16 т.

Преимуществами этих локомотивов являются снижение затрат на ГСМ на 30-40%, сниженный уровень выбросов вредных веществ, продление сроков эксплуатации силовой установки, увеличение срока службы масла. Кроме того, новые локомотивы способны перевозить грузы максимальной массой до 9 тысяч тонн.

Эффективность использования этого вида топлива, особенно на отдаленных и неэлектрифицированных участках железной дороги, уже оценили российские компании и начинают заказывать газовую технику.

Вторым не менее важным направлением в развитии железнодорожного транспорта на газомоторном топливе являются работы по созданию маневровых газовых тепловозов, которые были начаты в 1987 г. во ВНИИЖТ при содействии локомотивного депо Москва-III.

Первый серийный маневровый тепловоз ТЭМ2 был переоборудован для эксплуатации на сжатом (компримированном) природном газе. В 1989 г. он был испытан и продемонстрирован в действии, в 1990 г. было принято решение о постройке опытной партии маневровых газовых тепловозов на «Брянском машиностроительном заводе (далее - БМЗ)». Газодизель-генератор ГДГ50 для этих тепловозов был произведен «Пензенским дизельным заводом (ПДЗ)».

В течение нескольких последующих лет на макетном тепловозе производилась доводка газодизельгенератора, испытывались различные схемы подачи газа и смесеобразования. В результате, были выбраны схемы и проверена их работоспособность, а также выработаны технические решения для основных узлов газоподготовки на тепловозе. В 1995 г. доводочные работы были закончены, газодизельгенератор ГДГ50 прошел приемочные межведомственные испытания и был рекомендован для применения на опытных газовых тепловозах ТЭМ18Г (рис.11).



Рисунок 11. Маневровый тепловоз на КПГ ТЭМ18Г

В 1997 г. на «БМЗ» был построен первый маневровый газовый тепловоз ТЭМ18Г-001, а в 1998 г.- ТЭМ18Г-002. С конца 2000-х годов эти тепловозы находились в опытной эксплуатации в депо Ховрино Октябрьской железной дороги. Дизельные двигатели этих локомотивов работали на сжатом (компримированном) природном газе с подачей в цилиндры запальной порции дизельного топлива в объеме 15%. Принятая схема газификации тепловозов обеспечивала:

- ✓ минимальные затраты на переоборудование серийного дизеля для работы на газе;
- ✓ конвертируемость дизеля при минимальном повышении удельного расхода топлива в случае обратного перехода на дизельное топливо;
- ✓ возможность использования для снабжения газом разветвленной сети (ок. 200 ед.) автомобильных газонаполнительных компрессорных станций;
- ✓ готовность газа к подаче в цилиндры дизеля (в отличие от сжиженного газа, который требует применения испарителя), что обеспечивает быстрое протекание переходных процессов при изменении режима работы.

В дальнейшем, по инициативе ОАО «РЖД», были изготовлены несколько опытных образцов маневровых газопоршневых локомотивов на СПГ:

- ТЭМ18Г – два образца построены на мощностях «Брянского машиностроительного завода (БМЗ)» в 1997–1998 гг., максимальное замещение дизельного топлива газом – 50 %, запас СПГ – 600 кг; в настоящее время находятся в ОАО «ВНИИЖТ»;
- ЧМЭЗГ – в 2004 г. переоборудован по проекту ОАО «ВНИИЖТ», замещение дизельного топлива газом увеличено до 60 %, запас СПГ – до 800 кг; решение о серийном производстве машин не принято;
- ТЭМ19 – произведены на АО «УК «БМЗ», мощность – 880 кВт (1197 л.с.), запас СПГ – 5 т; первая поездка состоялась в декабре 2013 г.

В 2013 г. по заказу ОАО «РЖД» АО «Трансмашхолдинг» (АО «УК «БМЗ») изготовил первый в мире газопоршневой тепловоз ТЭМ19, работающий на СПГ (рис. 12). На локомотиве установлен газопоршневой двигатель 8ГЧН21/26, изготовленный ОАО «Волжский дизель им. Маминых». В настоящее время газопоршневой тепловоз ТЭМ19 проходит подконтрольную эксплуатацию на станции Егоршино Свердловской железной дороги. Первый этап испытаний газопоршневого тепловоза завершен в конце 2014 г.



Рисунок 12. Маневровый тепловоз на СПГ ТЭМ19

Газовый тепловоз ТЭМ-19 предназначен для эксплуатации на крупных железнодорожных узлах. В настоящее время завершен полный комплекс его испытаний, включая сертификационные, оформлен сертификат соответствия на

газовый тепловоз. Результаты подконтрольной эксплуатации маневрового тепловоза ТЭМ-19 показали, что по сравнению с маневровыми тепловозами ТЭМ18ДМ газовый тепловоз позволяет снизить удельные затраты на топливо до 26 %. Экономия затрат за период жизненного цикла газового тепловоза по сравнению с тепловозом ТЭМ18ДМ составляет 5,7 %.

Таким образом, за последние 20 лет российские производители железнодорожного транспорта добились существенного прогресса в развитии технологий производства локомотивов на сжиженном природном газе (рис.13)



Рисунок 13. Эволюция производства газовых тепловозов на СПГ

РАЗДЕЛ II. Технические особенности железнодорожного транспорта на газомоторном топливе российского производства.

1. Магистральные газотурбовозы на сжиженном природном газе.

1.1. Газотурбовозы ГТ1h-001 и ГТ1h-002.

Применение в качестве дешевого и экологически чистого топлива для локомотивов, работающих на сжиженном природном газе (СПГ), является одним из перспективных направлений реализации Энергетической стратегии ОАО «РЖД». Данная технология позволяет снизить затраты на приобретение дорогостоящего дизельного топлива и, как следствие, добиться снижения себестоимости грузоперевозок. Также, по расчетам экспертов, в 2 – 2,5 раза снижается выброс вредных веществ в атмосферу.

Железнодорожный транспорт - один из крупнейших потребителей нефтепродуктов в России. Доля потребления дизельного топлива составляет около девяти процентов от общего потребления в стране. Компанией ОАО «РЖД» поставлена задача замещения к 2030 году 30% расходуемого автономными локомотивами дизельного топлива природным газом. Стоит отметить, что стоимость природного газа на 50% ниже стоимости дизельного топлива.



Рисунок 14. Газотурбовозы ГТ1h-001 и ГТ1h-002

Разработчиками тягового подвижного состава, использующего в качестве топлива природный газ, выступают главным образом специалисты профильных организаций научно-технического комплекса ОАО «РЖД» (ВНИКТИ, ВНИИЖТ) совместно с производителями (Людиновский тепловозостроительный завод, ПАО «Кузнецов» и др.) (табл.2).

Наименование	Исполнитель работ
--------------	-------------------

Разработка конструкторской документации	АО «ВНИКТИ» (г. Коломна)
Изготовление первого опытного образца	Воронежский тепловозремонтный завод ОАО «Желдорреммаш»
Установочная серия и серийное производство	АО «Людиновотепловоз» (ЗАО Группа «Синара»)
Силовая газотурбинная установка	ПАО «Кузнецов» (г. Самара)
Тяговый генератор	ООО «Электротяжмаш - Привод» (г. Лысьва)
Криогенная емкость	АО «Уралкриомаш» (г. Нижний Тагил)
Преобразователь собственных нужд	НПО «Автоматики» (г. Екатеринбург)
Криогенный насос	Компания «Криомек» (Швейцария)
Микропроцессорная система контроля и управления	АО «ВНИКТИ» (г. Коломна), НПО «Элара» (г. Челябинск)
Программное и алгоритмическое обеспечение	АО «ВНИКТИ» (г. Коломна)
В создании газотурбовоза участвовали 85 предприятий промышленности и ВПК Российской Федерации. Технические решения защищены 38 патентами, в том числе 14 международными.	

Таблица 2. Основные участники разработки и изготовления магистрального газотурбовоза

Изготовленный в 2007 году опытный магистральный газотурбовоз ГТ1h-001 на базе электровоза ВЛ15-008 включает газотурбинный двигатель НК-361 мощностью 8.3 МВт (таблица 3, рис.15), установленной на одной раме с турбогенератором, системы всасывания, выхлопа, шумоглушения, пожаровзрывобезопасности. Для достижения заявленных параметров, обеспечения качества воздуха, подводимого извне на вход двигателя, допустимого уровня шума и безопасности обслуживания, конструкторы в СНТК разработали ряд узлов оригинальной конструкции. Среди них входное устройство с противообледенительной системой фильтрации воздуха, продувочный контур, изолирующий отсек силового блока от высоких температур газотурбинной установки, выходное устройство с системой шумоглушения, а также валы трансмиссии, соединяющие свободную силовую турбину с основным и вспомогательным генераторами и обеспечивающие требуемый уровень их соосности.

На газотурбовозе используется электрическая передача: газотурбинный двигатель, работающий на сжиженном природном газе, соединен с генератором переменного тока, а вырабатываемый последним ток выпрямляется и подается на тяговые электродвигатели, которые и приводят локомотив в движение.

Наименование	Параметр
Тип двигателя НК-361	Двухвальный, со свободной силовой турбиной
Полная (максимальная) мощность газотурбинного двигателя на валу свободной турбины, кВт/л.с.	8 300/11 285
Расход газообразного топлива, кг/ч: <ul style="list-style-type: none"> – на режиме полной мощности – на режиме холостого хода 	2 500 600
Расход масла, кг/ч	0,3
Мощность тягового генератора, кВт	7 370
Максимальное линейное напряжение тягового генератора, В	1 200
Ток тягового генератора в часовом режиме при напряжении 925 В, А	2x2 560
Максимальное выпрямленное значение напряжения тягового генератора, В	1 500
Масса агрегатов (сухая), кг, не более: <ul style="list-style-type: none"> – силового блока со всем оборудованием – двигателя с входной и выходной улитками без воздухоочистительного устройства – тягового генератора 	35 000 11 880 1050
Полный срок службы (назначенный ресурс) силового блока не менее, часов	200 000
Сила тяги при трогании с места, кН/тс	882/90
Экипировочный запас топлива локомотива, тонн/км	20 / 750-1000

Таблица 3. Основные параметры газотурбинного двигателя НК 361



Рисунок 15. Внешний вид НК-361

Газотурбовоз состоит из двух секций: тяговая и бустерная, каждая из которых имеет кабины управления. В тяговой секции помещен энергосиловой блок, включающий газотурбинный двигатель и газовый электрический генератор. В бустерной секции находятся блок криогенной емкости с запасом сжиженного природного газа и криогенный насос, обеспечивающий доставку газа в тяговую секцию. Сжиженный природный газ, необходимый для работы газотурбинного двигателя, хранится в криогенной емкости под давлением от 3 до 6 атмосфер и при температуре минус 140 - 161 С⁰. Заполнение емкости сжиженным газом производится на специальных газозаправочных комплексах. Уже заправленная, емкость может быть доставлена в любые регионы России, где ее установят на газотурбовозы. Из криогенной емкости сжиженный газ с помощью насоса высокого давления подается в тяговую секцию. Он поступает в теплообменный контур, расположенный за силовой турбиной двигателя в выхлопном устройстве. Здесь происходит повышение температуры топлива и его регазификация. Для компенсации расширения топлива в результате регазификации применяется ресивер. Это емкость, в которую поступает газ из теплообменника, и откуда он затем отправляется в газотурбинные установки. Для работы газотурбинного двигателя в его камеру сгорания должна поступить смесь газа и воздуха. Атмосферный воздух втягивается через входную улитку, поступая сначала в компрессор низкого, а затем высокого давления. Вращающиеся лопатки компрессоров повышают давление воздуха, и он подается в камеру сгорания, где смешивается с поступающим из ресивера природным газом и воспламеняется. Струя продуктов сгорания вращает лопатки силовой турбины, которые передают вращающий момент компрессорам низкого и высокого давления и приводному валу генератора. Продукты сгорания выводятся через выхлопную систему, нагревая или газифицируя топливо в теплообменнике. Зарегистрированный показатель вредных выбросов в 5 раз ниже, чем требуют технологические нормы Евросоюза, выдвигаемые к 2012 году. В результате вращения турбины и ротора тягового генератора вырабатывается электрический ток, приводящий в действие тяговые электродвигатели, расположенные на каждой из 12-ти колесных пар газотурбовоза. Надежность авиационных газотурбинных двигателей позволяет довести наработку до 30000 часов без разборки двигателя, а в локомотивном варианте газотурбинного двигателя эта величина может быть существенно выше. Стоимость сжиженного цикла локомотива с такой установкой на 20% ниже дизельной, так как газотурбинный двигатель работает на более щадящих режимах и имеет меньше трущихся деталей, что увеличивает его ресурс и делает газотурбовоз дешевле в ремонте и обслуживании.

Визуализация принципа работы газотурбовоза подробно представлена в видеоматериале, который может быть доступен по ссылке: <HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=A-ISL29TXO8>

В соответствии с задачей ОАО «РЖД» по отработке перспективных технических решений 02.10.2017 в АО «ВНИКТИ» завершены испытания трехпоршневого криогенного насоса АНМ-100.5ХА производства ООО «Псковтехгаз» (рис. 16), который был смонтирован на ГТ1h-001 вместо насоса Delta N80, произведенного компанией Fives Cryomec AG (Швейцария).

С 16.01.2018 начались эксплуатационные испытания газотурбовоза ГТ1h-001 с криогенным насосом АНМ-100.5ХА на полигоне СВЖД. Программой испытаний предусмотрена наработка 500 моточасов, по состоянию на 01.10.2018 наработка криогенного насоса составила 271,65 моточасов.



Рисунок 16. Криогенный насос АНМ-100.5ХА

Основным отличием двух модификаций газотурбовозов является то, что газотурбовоз ГТ1h-002 (табл. 4) оснащен газотурбинной силовой установкой мощностью 8500 кВт, которая обеспечивает силу тяги в длительном режиме 80 т, а при трогании с места – 90 т. Длина каждой секции локомотива – 21,5 м, а его общая длина – 43 м. Масса бустерной секции с емкостью для хранения сжиженного природного газа – 184 т. Аналогичную массу имеет тяговая секция, на которой расположена силовая установка. Таким образом, общая масса локомотива составляет 368 т, а максимальная нагрузка на ось – 23 т. Конструкционная скорость достигает 100 км/ч. Особенностью газотурбовоза ГТ1h-002 стала принципиально новая криогенная емкость для топлива, конструкция которой позволяет осуществлять дозаправку сжиженным газом при нахождении ее непосредственно на локомотиве. Она вмещает до 20 т сжиженного газа.

Параметр	ГТ1h-001	ГТ1h-002
Мощность, кВт	8300	8500
Сила тяги длительного режима, кН	630	700
Запас топлива, т	17	20
Запас хода без дозаправки, км	800	1000
Экономия затрат за период жизненного цикла по сравнению с 2ТЭ116, %	19,4	19,4
Снижение выбросов вредных веществ по сравнению с дизелями тепловозов, раз	5	5

Таблица 4. Основные отличия ГТ1h-001 и ГТ1h-002

1.2. Опыт эксплуатации газотурбовозов ГТ1h-001 и ГТ1h-002.

Свердловская железная дорога была выбрана в качестве полигона для испытаний опытных образцов газомоторной железнодорожной техники – газотурбовозов. Имеющиеся на СвЖД протяженные неэлектрифицированные участки различного профиля хорошо подходят для эксплуатации газотурбовозов. Подготовлена и инфраструктура – под Екатеринбургом построен комплекс по производству СПГ со специальным пунктом для заправки подвижного состава. Семь наиболее опытных локомотивных бригад прошли специальную переподготовку для вождения перспективных машин.

С октября 2013 года на базе депо Егоршино эксплуатируется первый магистральный газотурбовоз ГТ1h-001. Он успешно водит поезда (в том числе повышенного веса и длины) на участке Егоршино – Алапаевск – Серов-Сортировочный.

С 2014 года на СвЖД проводились испытания маневрового газотепловоза ТЭМ19 (оснащен газопоршневым двигателем), который затем официально пополнил локомотивный парк Свердловской магистрали.

В ноябре 2015 года на дорогу поступил второй, усовершенствованный (серийный) образец газотурбовоза ГТ1h-002.

Важным этапом испытаний была проверка возможностей газотурбовоза на северном неэлектрифицированном полигоне Свердловской магистрали, где в перспективе планируется организовать эксплуатацию такой техники. В рамках эксперимента 23 мая 2016 года ГТ1h-002 успешно провел без дозаправки в пути поезд массой 9 тыс. тонн на участке Сургут – Войновка (почти 700 км).

В июле 2018 года ГТ1h-002 совершил две экспериментальные поездки с грузовыми поездами повышенной массы и длины на участке Сургут – Лимбей – Коротчаево. Необходимо было подтвердить правильность расчетов месторасположения точек экипировки и заправки газомоторных локомотивов на севере Уральского федерального округа, а также определить критическую (максимальную) норму массы грузовых поездов для газотурбовозов серии ГТ1h

на данном направлении. В ходе эксперимента была установлена возможность вождения на участке Сургут – Лимбей – Коротчаево (636 км) поездов массой до 7 тыс. тонн, а на участке Лимбей – Сургут (532 км) – до 9 тыс. тонн без дополнительной заправки.

В целом, в рамках программы испытаний на Свердловской железной дороге газомоторные локомотивы в реальных условиях эксплуатации подтвердили заявленные технико-экономические, эксплуатационные и экологические характеристики. (табл.5, табл.6).

ГТ1h-002		2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	ВСЕГО 2013-2018
Кол-во поездок ВСЕГО	поездка	96	86	160	103	32	33	510
Работа	млн.тнкм.бр	101,134	32,38	103,78	110,6	25,03	6,9	373
Пробег в голове поезда	км	17137	6817	20118	20430	5366	2388	72256
Заправлено СПГ ВСЕГО	тонн	546,2	236,0	674,58	613,64	179,7	153,5	2403,5
Расход СПГ ВСЕГО	тонн	513,3	196,9	575,01	591,86	165,4	139,8	2182,3
В том числе:								
– на тягу поездов	тонн	413,4	152,2	490,48	497,04	133,3	55,8	1742,2
– простой, технологию, маневр	тонн	99,8	34,4	84,535	94,82	32,1	84	429,7
Средний вес поезда	тонн	5771	4054	4252	4770	4665	2872	4397,3
МАХ вес поезда	тонн	8927	6258	8242	8836	8921	5819	8927
Ср. уд. расход СПГ ВСЕГО	кг у.т./изм.	64,2	78,8	87,0	84,0	103,7	320,1	123
Ср. уд. расход СПГ на тягу	кг у.т./изм.	64,2	73,8	74,2	70,6	83,6	127,7	82,4
Ср. уд. расход СПГ ВСЕГО	МДж/10тыс.тн.к м.бр	-	-	2549,6	2462,5	3040,3		2684,1

Таблица 5. Основные результаты опытной эксплуатации ГТ1h-001 на Свердловской железной дороге за 2013 - 2018 гг.

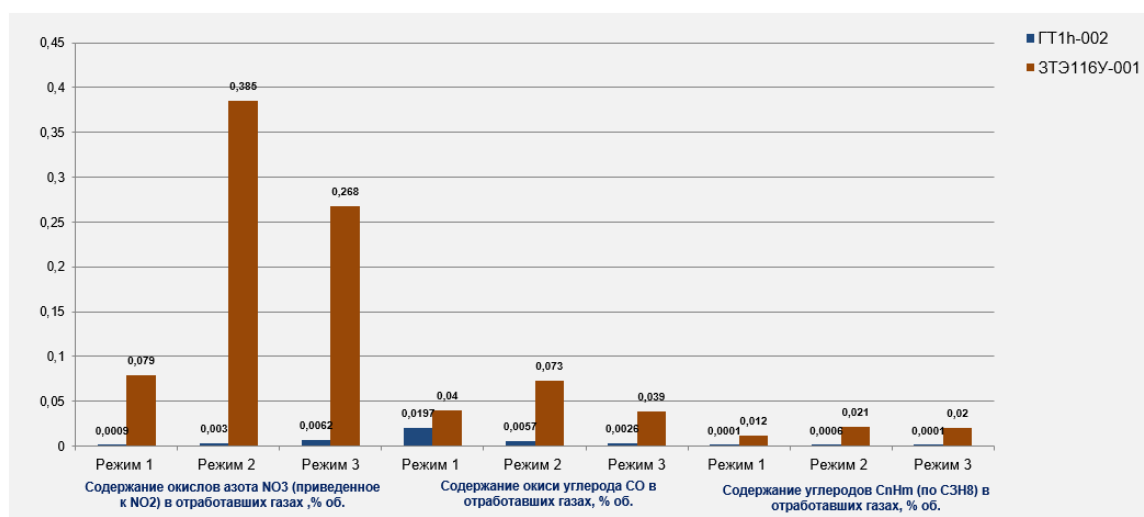
ГТ1h-002		2015 г. с 12.11.2015	2016 г.	2017 г.	2018 г.	ВСЕГО 2015-2018
Кол-во поездок ВСЕГО, в т.ч.	поездка	32	61	98	51	242
Работа	млн.тнкм.бр	28,4	84,07	171,3	42,5	324,1
Пробег в голове поезда	км	5 127	13 538	24 872	8 049	51 5865
Заправлено СПГ в БКЕ	тонн	169,5	428,97	772,11	298,3	1 647
Расход СПГ ВСЕГО	тонн	147,6	428,97	757,11	283,3	1617
В том числе:						
– на тягу поездов	тонн	116,3	344,77	637,3	81,9	1 299,8
		31,3	84,2	119,8		317,2

– простой, технологию, маневр						
Средний вес поезда	тонн	4 700	6 210	6 888	5 283	5 770,3
МАХ вес поезда	тонн	7 963	8 937	9 093	9 220	8 974
Ср. уд. Расход СПГ ВСЕГО	кг у.т./изм.	81,6	80,1	69,49	104,6	84
Ср. уд. Расход СПГ на тягу	кг у.т./изм.	64,3	64,4	58,4	74,4	65,4
Ср. уд. Расход СПГ ВСЕГО	МДж/10тыс.тн .км.бр	2392,8	2348,1	1901,2		2214

Таблица 6. Основные результаты опытной эксплуатации ГТ1h-002 на Свердловской железной дороге за 2015 - 2018 гг.

Отличительной особенностью принципиально нового вида тягового подвижного состава, работающего на СПГ, по сравнению с широко применяемыми дизельными аналогами ЗТЭ116У, является высокая экологическая эффективность (рис.17) и более низкая стоимость жизненного цикла (рис.18), при этом он может развивать значительную мощность при сравнительно небольших габаритах и массе, на равнинных участках способен водить тяжеловесные составы весом до 15 тыс. тонн. Даже при полной проектной нагрузке газотурбовоз развивает скорость до 100 км/ч. Показатели выхлопа газотурбинного двигателя соответствуют самым строгим европейским экологическим стандартам, а уровень внешнего шума укладывается в действующие санитарные нормы РФ.

Экологическая эффективность газотурбовоза ГТ1h-002 по сравнению с тепловозом ЗТЭ116У



- Режим 1 соответствует нулевому нагружению (холостой ход) – 0 позиция контроллера;
- Режим 2 соответствует частичному нагружению - 8 позиция контроллера;
- Режим 3 соответствует полному нагружению – 15 позиция контроллера.

Рисунок 17. Сравнение выбросов в атмосферу ГТ1h-002 и ЗТЭ116У

Исходя из показателей по выбросам, газотурбовозы являются более экологичным видом тягового подвижного состава по сравнению с дизельными

тепловозами. Испытания ГТ1h показали 5-кратный запас по выбросам относительно действующих требований к дизельным двигателям.

Предварительные результаты подконтрольной эксплуатации показывают, что по сравнению с грузовыми тепловозами 2ТЭ116 магистральный газотурбовоз позволяет снизить на 30 % расходы на перевозку одной тонны груза и получить экономию текущих расходов на топливо до 35 %, экономия затрат за период жизненного цикла по сравнению с тепловозами 2ТЭ116 составляет 19,4%. Высокая мощность газотурбовозов позволяет им перемещать составы большой длины и массы. Для сравнения: мощность дизелей распространенного на полигоне российских железных дорог грузового двухсекционного тепловоза 2ТЭ116 – 4400 кВт (2×2200 кВт), а мощность нового газотурбовоза ГТ1h – 8500 кВт, что особенно важно при оценке альтернатив грузовым тепловозам на неэлектрифицированных участках.

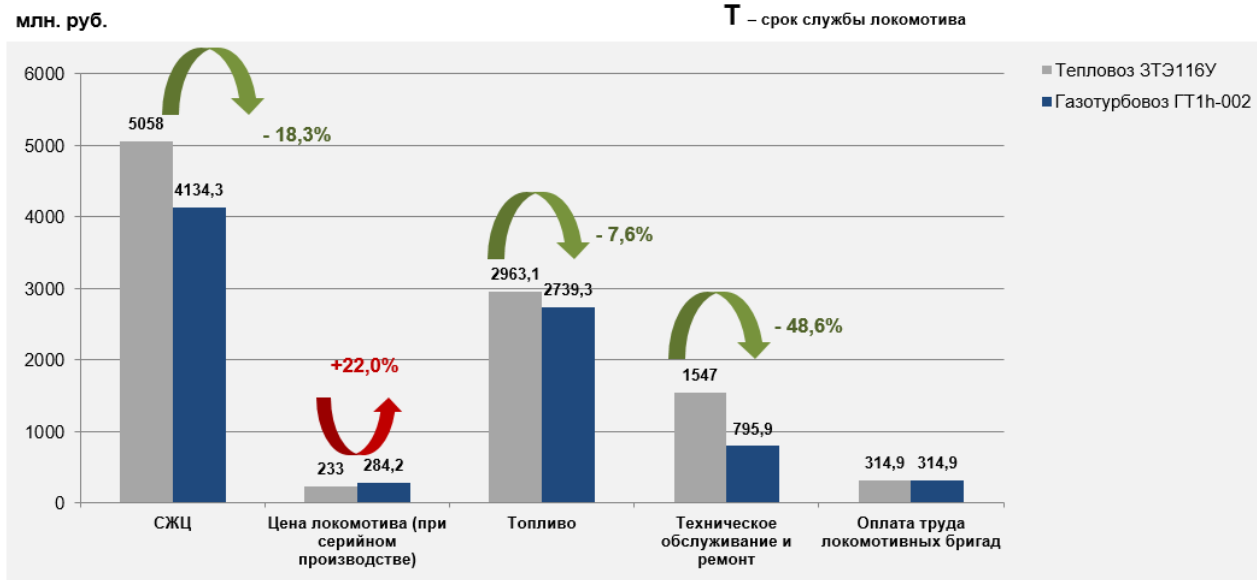
По данным Свердловской железной дороги, при освоении мощных грузопотоков применение тягового подвижного состава на СПГ позволит существенно сократить эксплуатационные затраты за счет использования более дешевого топлива (стоимость СПГ на 40 - 50 % ниже стоимости дизельного топлива), высокой мощности газотурбовоза (один газотурбовоз заменит два тепловоза 2ТЭ116). Кроме того, в связи с повышенной тяговой мощностью газотурбовоза на стыковочных станциях электро/тепловозной тяги можно избежать работ по расформированию состава при переходе на иной вид тяги.

Важно отметить, что расчетный срок службы газотурбовоза составляет 40 лет, что в 2 раза выше, чем у тепловоза. При этом потребность в ремонте газотурбовоза ниже благодаря меньшему загрязнению движущихся частей в сравнении с дизельными двигателями. Это дает возможность повысить коэффициент технической готовности локомотива. Таким образом, стоимость жизненного цикла газотурбовоза ниже по сравнению с тепловозом за счет меньших затрат на топливо, обслуживание и ремонт.

Сравнение стоимости жизненного цикла (СЖЦ) газотурбовоза ГТ1h-002 и трехсекционного тепловоза ЗТЭ116У

$$СЖЦ = C_{пр} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot d^t, \text{ где:}$$

$C_{пр}$ – цена приобретения локомотива
 I_t – годовые эксплуатационные расходы
 ΔK_t – сопутствующие единовременные затраты
 L_t – ликвидационная стоимость
 d^t – коэффициент дисконтирования
 T – срок службы локомотива



Экономия затрат жизненного цикла при использовании газотурбовозов по сравнению с тепловозами ЗТЭ116У составляет 18,3%, что обеспечивается при цене СПГ не более 50% цены дизельного топлива.

Рисунок 18. Сравнение стоимости жизненного цикла ГТ1h-002 и ЗТЭ116У.

2. Маневровые тепловозы

2.1. Маневровый тепловоз на сжиженном природном газе.

В 2013 г. по заказу ОАО «РЖД» АО «Трансмашхолдинг» (АО «УК «БМЗ») изготовил первый в мире газопоршневой тепловоз ТЭМ19, работающий на СПГ (рис. 12). На локомотиве установлен газопоршневой двигатель 8ГЧН21/26, изготовленный ОАО «Волжский дизель им. Маминых», ООО «Криомаш-Балашихинский завод криогенного машиностроения» (в Балашихе разработана криогенная система хранения СПГ на борту и система отогрева и выдачи газа в двигатель тепловоза). В настоящее время газопоршневой тепловоз ТЭМ19 проходит подконтрольную эксплуатацию на станции Егоршино Свердловской железной дороги. Первый этап испытаний газопоршневого тепловоза завершен в конце 2014 г.



Рисунок 19. Маневровый тепловоз на СПГ ТЭМ19

Внешний облик локомотива определяет криогенная ёмкость для хранения СПГ и система газоподготовки. В конструкции применена система охлаждения газопоршневого двигателя с применением антифриза в качестве охлаждающей жидкости. Экипажная часть тепловоза сконструирована на базе локомотива ТЭМ18ДМ.

Главной отличительной особенностью тепловоза является газопоршневой двигатель, работающий полностью на природном газе. Природный газ на борту хранится в сжиженном состоянии, т.к. это позволяет существенно сократить требуемый объём хранения. Использование в качестве топлива СПГ позволяет

существенно сократить эксплуатационные затраты и значительно снижает объём вредных выбросов в атмосферу. Блочный принцип компоновки упрощает обслуживание и ремонт локомотива. Применение моторно-осевых подшипников качения исключает из технологического процесса обслуживание колёсно-моторных блоков. ТЭМ19 оборудуется комплексом систем безопасности. Ширина колеи тепловоза ТЭМ19 стандартная – 1520 мм. Тепловозы с такой шириной колеи стали выпускать на постоянной основе еще с 60-х годов XX века.

Газовый тепловоз ТЭМ-19 предназначен для эксплуатации на крупных железнодорожных узлах. В настоящее время завершён полный комплекс его испытаний, включая сертификационные, оформлен сертификат соответствия на газовый тепловоз.

Основные технические характеристики маневрового тепловоза ТЭМ-19, предоставленные ОАО «РЖД», приведены в табл. 7.

Параметр	Показатель
Мощность двигателя, кВт (л.с.)	880 (1197)
Двигатель	Газопоршневой 8ГЧН21/26
Осевая формула	3 ₀ -3 ₀
Количество тяговых осей	6
Статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	206 (21)
Служебная масса, т	126
Конструкционная скорость, км/ч	100
Сила тяги при трогании с места, кН (тс)	319 (32,5)
Длина по осям автосцепок, мм	20000
Вид топлива	сжиженный природный газ
Запас топлива, кг	4500
Тип электрической передачи мощности	переменно-постоянного тока
Время между заправками, сут.	6
Снижение выбросов NO _x и CO ₂ , раз	3

Таблица 7. Основные характеристики маневрового тепловоза ТЭМ-19 на СПГ

Конструкция маневрового тепловоза состоит из модулей: кабина машиниста, криогенная установка, дизель-генератор, система охлаждения, аппаратная камера. В конструкции используются и ряд других модулей и блоков. Модульный принцип компоновки позволил упростить ремонт и обслуживание локомотива.

Тепловоз оснащён газовым двигателем и специальной ёмкостью-контейнером со слоисто-вакуумной изоляцией для хранения криогенного топлива (СПГ). Данная криогенная система укомплектована блоком криогенной арматуры, гибкими и жёсткими криогенными трубопроводами, а также системой

регазификации для организации подачи природного газа в обычном газообразном состоянии в двигатель локомотива. Стандартное крепление ёмкости для топлива позволяет при необходимости экипировки локомотива легко ее демонтировать и установить новую полную, что существенно снижает расходы при заправке (рис.20).



Рисунок 20. Замена емкости СПГ маневрового тепловоза на СПГ ТЭМ19

Примечательно, что газопоршневой двигатель 8ГЧН21/26 (рис.21) тепловоза работает по циклу Отто, то есть воспламенение газозвушной смеси происходит от искры. Ранее отечественные тепловозы, использовавшие метан, работали по газодизельному циклу.



Рисунок 21. Газопоршневой двигатель 8ГЧН21/26 маневрового тепловоза на СПГ ТЭМ19

Благодаря современным шумоизоляционным материалам существенно улучшаются условия работы машиниста, снижается общий уровень шума. В кабине предусмотрена система микроклимата, продумана эргономика (рис.22).

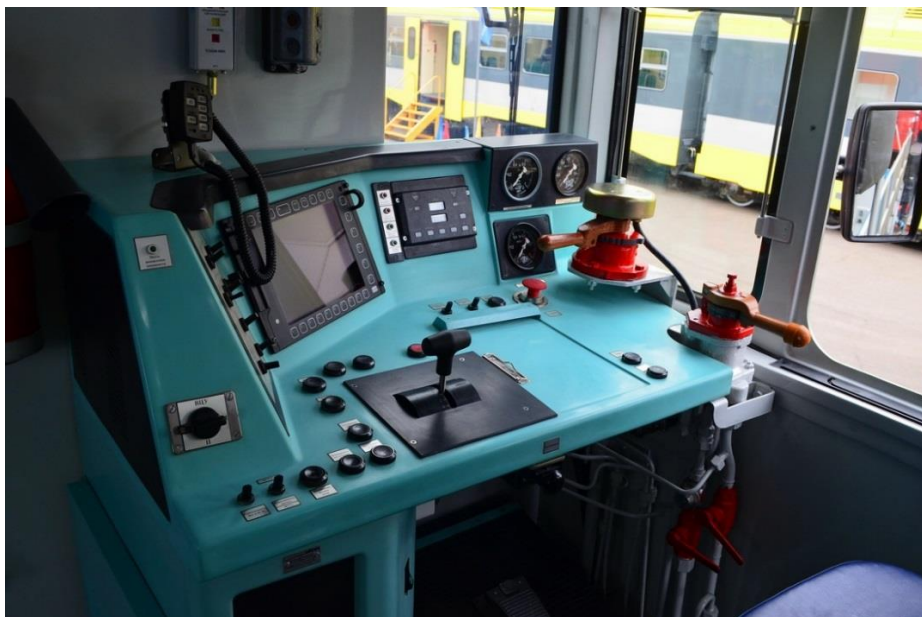


Рисунок 22. Кабина маневрового тепловоза на СПГ ТЭМ19

Визуализация состава маневрового тепловоза и его эксплуатация работы подробно представлена в видеоматериале, который может быть доступен по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=oniow6Yhsg0>

2.2. Опыт эксплуатации маневрового тепловоза ТЭМ19 на СПГ.

С 2014 года на СвЖД проводились испытания маневрового тепловоза ТЭМ19 на СПГ, который затем официально пополнил локомотивный парк Свердловской магистрали.

Результаты эксплуатации за период 2014-2018 гг. приведены в таблице 8.

ТЭМ19		2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г	2018 г	ВСЕГО 2014-2018
Отработано смен	смена	38	164	350	340	347	1239
Отработано часов	тыс. час	0,45	1,97	4,18	3,84	4,12	14,56
Пробег	тыс. лок- км	2,4	11,7	14,5	16,9	26,8	72,3
Обработано вагонов	тыс. вагонов	6,4	28,1	70,1	56,8	67,1	228,5
Масса переработанных вагонов	Млн. тонн	0,28	1,24	3,15	2,86	2,7	10,23
Расход СПГ	тонн	23,2	51	89,3	110,6	88,2	362,3
Удельный расход на ст.Егоршино	кг у.т./ 100лок.км.	959,8	438	616,1	653,9	517,7	637,1

Таблица 8. Основные результаты опытной эксплуатации маневрового тепловоза ТЭМ19 на СПГ на Свердловской железной дороге за 2015 - 2018 гг.

Результаты подконтрольной эксплуатации маневрового тепловоза ТЭМ-19 показали, что по сравнению с дизельными маневровыми тепловозами ТЭМ18ДМ газотепловоз позволяет снизить удельные затраты на топливо до 26 %. Срок службы газотепловоза составляет 25 лет, в то время как у дизельного - 16 лет. Экономия затрат за период жизненного цикла газотепловоза по сравнению тепловозом ТЭМ18ДМ составляет 5,7 %.

3. Технические решения для перевозки, хранения и заправки СПГ

3.1 Вагоны-цистерны для перевозки и хранения СПГ

Важным элементом развития железнодорожной СПГ-инфраструктуры является вопрос транспортировки СПГ. За рубежом, особенно в США, железнодорожные перевозки СПГ используются довольно широко, налажено производство железнодорожных цистерн для перевозки СПГ объемом 129 м³.

Впервые в СССР вопрос транспортировки СПГ вагонами-цистернами был поставлен в связи с попыткой перевести железнодорожные локомотивы (тепловозы) на СПГ в начале 1980-х годов. «Уралкриомаш» было поручено разработать два опытных образца вагонов-цистерн и в дальнейшем перейти на их серийный выпуск.

В ОАО «Уралкриомаш» на базе существовавшего вагона-цистерны для перевозки этилена модели 15-147 была разработана конструкторская документация на универсальную цистерну 15-147У (рис. 23), изготовлены наиболее технологически важные узлы цистерны (система безопасных дренажных устройств) и на специальном стенде проведены исследовательские работы по отработке режимов безопасного сброса паров СПГ в атмосферу. За основу была принята технология сброса паров СПГ из автоцистерны модели 11Г729, которая включала в себя нагрев в теплообменнике поступающих под избыточным давлением из емкости дренажируемых паров и последующий их сброс в атмосферу по трубке малого диаметра при скоростях истечения, соответствующих минимальному давлению в сосуде, обусловленному предотвращением диффузионного проникновения атмосферного воздуха внутрь трубы при сбросе.



Рисунок 23. Вагон-цистерна модели 15-147У производства АО «Уралкриомаш»

На железнодорожной цистерне модели 15-147У применялась порошково-вакуумная теплоизоляция на основе аэрогеля, что требовало значительного времени для ее охлаждения перед заполнением емкости вагона-цистерны СПГ. Использование порошково-вакуумной теплоизоляции эффективно для изоляции сосудов емкостей железнодорожных цистерн для жидкого азота, кислорода и аргона, у которых температура кипения криогенного компонента значительно ниже 77 К для азота по сравнению с 113 К для метана. Следовательно, появилась возможность использовать теплоизоляцию для емкости менее дорогостоящую, но более эффективную с точки зрения сокращения временного охлаждения — волокнисто-вакуумную теплоизоляцию на основе базальтового волокна. Это обеспечило бы сокращение времени залива цистерны и отправки ее потребителю.

Этот принцип был реализован на модели 15-5106, серийное производство которой АО «Уралкриомаш» начал в 2016 году. Модель 15-5106 – это вагон-цистерна для перевозки и хранения сжиженного природного газа и этилена (рис. 24):



Рисунок 24. Вагон-цистерна модели 15-5106 производства АО «Уралкриомаш»

Вагон-цистерна модели 15-5106 имеет увеличенный котел и предназначен для транспортировки и хранения сжиженного природного газа (СПГ) и жидкого этилена; вагон-цистерна транспортируется в железнодорожных составах общего назначения.

Цистерна модели 15-5106 состоит из криогенного резервуара с двойными стенками, установленного на железнодорожной платформе с серийными двухосными тележками модели 18-100 грузовых вагонов. На платформе с обеих сторон цистерны установлены защитные устройства для предотвращения пробоя днища емкости автосцепкой соседнего вагона на сортировочных горках

Внутренний сосуд цистерны выполнен из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, наружный кожух — из углеродистой стали 09Г2С. На сосуд нанесена теплоизоляция — базальтовые маты, межстенное пространство между сосудами и оболочкой отвакуумировано до остаточного давления 1×10^{-2} мм рт. ст.

Цистерна снабжена приборами замера уровня жидкости и давления в сосуде, предохранительными устройствами (клапаны и мембраны) от превышения давления, дренажными устройствами для безопасного сброса паров в атмосферу.

Запорная арматура - ручная, с сифонным уплотнением по штоку. Заправка и выдача продукта проводится по обе стороны цистерны.

Технические характеристики модели 15-5106 приведены в таблице:

Характеристика	СПГ	Этилен
Габарит	02-ВМ	
Вместимость, м ³	65,4	
Масса порожней цистерны, т	41,9	
Масса заливаемого продукта, т	23,56	31,66
Максимально допустимое рабочее давление в сосуде, МПа (кгс/см ²)	0,5 (5,1)	
Испытательное давление в сосуде без учета вакуума в теплоизоляционной полости, МПа (кгс/см ²)	1,1 (11,22)	
Испытательное давление в сосуде при наличии вакуума в теплоизоляционной полости, МПа (кгс/см ²)	1,0 (10,2)	
Давление в изолирующем пространстве в период эксплуатации (в тёплом состоянии), Па (мм рт. ст.)	1,33 (1×10 ⁻²)	
Суточные потери от испарения при стационарном хранении приведенные к температуре: Т=306К (33°С) и Р=0,1 МПа (760мм рт. ст.), % в сутки:	0,417	0,227
Время бездренажного хранения при подъёме давления от 0,05 МПа до 0,5 МПа, суток:	42	85
Допустимая температура стенки сосуда, °С	от минус 196 до плюс 70	
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная	
Масса тары, т	40,45 ± 1,21	
Расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, максимальная, кН (тс)	230,3 (23,5)	
Длина, мм: -по осям сцепления автосцепок -по концевым балкам рамы -емкости	- 15090+67 (-45) - 13870 ± 10 - 14144 ± 40	
База, мм: -емкости -тележки	- 10000±5 - 1850+7(-5)	
Конструкционная скорость, км/час	120	
Модель двухосной тележки	18-100, тип 2	
Срок службы, лет	20	

Таблица 9. Основные технические характеристики модели 15-5106

3.2 Технические решения для заправки железнодорожного транспорта сжиженным природным газом

Требования к системам заправки железнодорожного транспорта сжиженным природным газом в России регламентируются документом ПНСТ 263-2018 «Пункты экипировки локомотивов, работающих на сжиженном природном газе. Требования к техническому оснащению и выбору мест расположения». Согласно этому документу пункты экипировки локомотивов СПГ должны обеспечивать выполнение следующих технологических операций:

- входного контроля качества СПГ, поступающего с комплексов по производству СПГ, на соответствие требованиям ГОСТ Р 56021 для марок А и Б;
- хранения, приема, выдачи (с осуществлением коммерческого учета) СПГ в объеме, необходимом для обеспечения бесперебойной работы всего парка локомотивов на полигоне (участке) обслуживания, рассчитанного на плановые нормативы перевозочного процесса;
- возврата газообразной фракции природного газа в стационарные криогенные емкости пункта экипировки с осуществлением коммерческого учета;
- приема СПГ в экстренных случаях;
- периодического мониторинга нормативных значений параметров и химического состава СПГ на соответствие требованиям ГОСТ Р 56021 для марок А и Б, находящегося как в стационарных криогенных емкостях пункта экипировки, так и в съемных криогенных емкостях локомотивов;
- инертизации систем газоподготовки (бортовых топливных систем) и, при необходимости, криогенных емкостей локомотивов, поступающих в депо для проведения ремонта локомотивов в объеме проектной мощности депо;
- удаление СПГ из криогенной емкости при его несоответствии требованиям ГОСТ Р 56021 для марок А и Б.

В ПНСТ 263-2018 также сформулированы требования к составу пунктов экипировки локомотивов СПГ, к их техническому оснащению и выбору мест расположения.

По информации ПАО «РЖД» в рамках программы эксплуатации газомоторных локомотивов на полигоне Свердловской железной дороги в период с 2013 г. по 2017 г. заправка газотурбовозов (3650,3 тонны СПГ) осуществлялась ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» на базе газораспределительной станции ГРС-4 (станция Аппаратная Свердловской

железной дороги) (рис. 25). КСПГ на базе ГРС-4 был запущен в эксплуатацию в 2010 г. Производительность КСПГ составляет 3 т/ч.



Рисунок 25. Заправка газотурбовозов на ГРС-4

В период с 2017 г. по 2018 г. заправка газотурбовозов осуществлялась с КСПГ Канюсята, ООО «Газэнергосеть Санкт-Петербург», Пермский край (511,3 тонны СПГ).

Всего в 2013 – 2018 гг. газомоторными локомотивами ПАО «РЖД» в рамках программы эксплуатации на полигоне Свердловской железной дороги израсходовано 4 161,6 тонн СПГ.

Кроме того, согласно заключенному в 2017 году договору «Газпром газомоторное топливо» осуществляет заправку газотурбовозов на станции Егоршино на полигоне Свердловской железной дороги. На станции создан газозаправочный пункт, где размещаются КРИОПАГЗ — специальные грузовые автомобили для транспортировки СПГ. Компания стала победителем открытого аукциона на поставку СПГ для «РЖД». Топливо будет регулярно доставляться с

производственных мощностей по сжижению природного газа Группы «Газпром». Всего в рамках контракта планируется поставить 600 тонн СПГ.

В феврале 2018-ого года в рамках Российского инвестиционного форума в г. Сочи подписана Программа мероприятий по реализации заключенного ранее Соглашения между ПАО "РЖД", ПАО "Газпром", ЗАО "Трансмашхолдинг" и АО "Группа Синара" о сотрудничестве в области использования газомоторного топлива. Для заправки газотурбовозов СПГ «Газпром» предполагает построить два малотоннажных комплекса по производству СПГ (на газораспределительных станциях в городах Тобольск и Сургут), а также площадки для размещения передвижных заправщиков на станциях Войновка и Сургут для заправки газомоторных локомотивов на железнодорожном участке Войновка-Тобольск-Сургут.

4. Новые разработки моделей железнодорожного транспорта на сжиженном природном газе.

С целью развития производства различных модификаций железнодорожного транспорта на базе имеющегося опыта и увеличения использования СПГ в качестве моторного топлива между ПАО «Газпром», ОАО «РЖД», АО Группа Синара и ЗАО «Трансмашхолдинг» подписана Программа мероприятий по реализации в 2018-2020 годах положений Соглашения о сотрудничестве, которая предусматривает выполнение конкретных мероприятий по развитию производственно-сбытовой инфраструктуры СПГ и увеличению парка газомоторных локомотивов, эксплуатируемых ОАО «РЖД».

В соответствии с Программой мероприятий Группа Газпром планирует создать до 2022 года два пункта экипировки газомоторных локомотивов (ст. Войновка и ст. Сургут), а также построить два малотоннажных комплекса по производству СПГ: на ГРС в г. Тобольске (максимальная производительностью до 5 т/час) и на ГРС в г. Сургуте (производительностью до 3 т/час). В свою очередь, ОАО «РЖД» планирует к 2025 году увеличить парк маневровых газотепловозов до 52 ед. (в настоящее время эксплуатируется 1 ед. ТЭМ19-001), магистральных газотурбовозов серии ГТ1h - до 25 ед. (в настоящее время эксплуатируется 2 ед.).

Для достижения практических результатов исполнения данной программы компании-производители ведут разработку новых серий газомоторных локомотивов: маневрового газотепловоза ТЭМ29 (ЗАО «Трансмашхолдинг») и маневровых локомотивов ГТЭМ1 и ТЭМГ (АО «Синара-Транспортные машины»). Также прорабатывается вопрос по возможности использования газотурбинных установок АО «КМПО» и АО «ОДК» на магистральном газотурбовозе серии ГТ1h взамен ГТД НК-361 производства ПАО «Кузнецов».

4.1. Маневровые локомотивы производства АО «Синара транспортные машины».

Новое поколение маневровых тепловозов на СПГ будет представлено двумя моделями производства АО «Синара транспортные машины» ТЭМГ1 (рис.26) и ГЭТМ1 (рис.27).

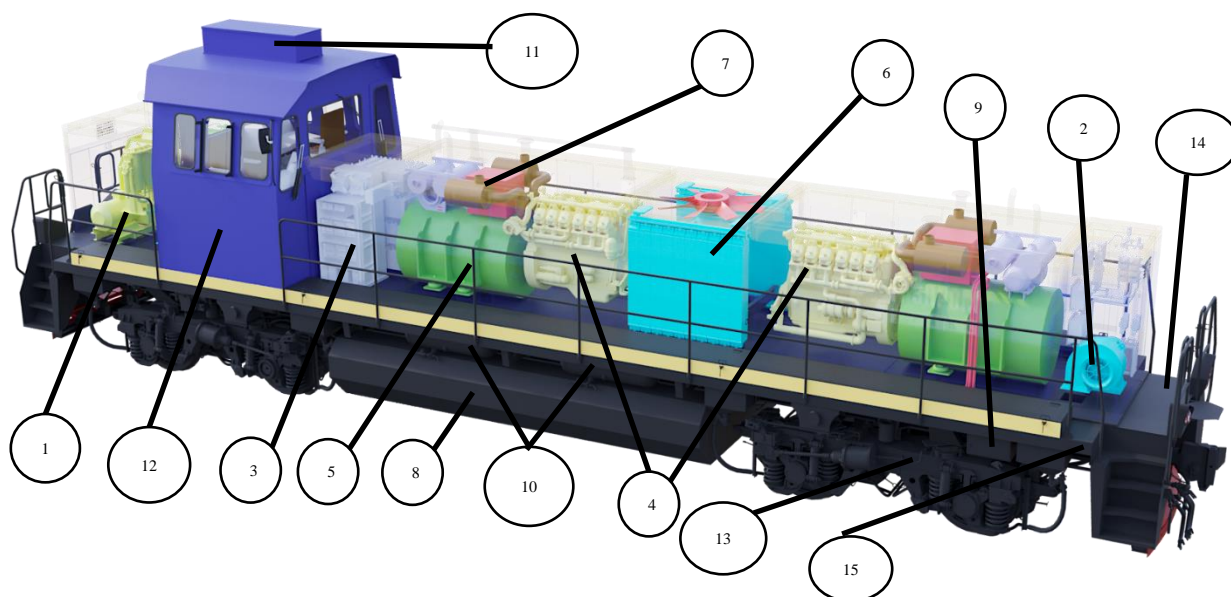


Рисунок 26. Маневровый тепловоз на СПГ ТЭМГ1



Рисунок 27. Маневровый тепловоз на СПГ ГЭТМ1

Основные технические особенности и элементные узлы новых тепловозов находятся в высокой степени проработки, при этом основной упор сделан на использование российских комплектующих для производства нового поколения маневровых тепловозов.



1 - компрессор с системой осушки воздуха, 2 – вентилятор охлаждения тяговых электродвигателей; 3 – преобразователь собственных нужд; 4 - двигатель; 5 - тяговый агрегат; 6 – система охлаждения двигателей; 7 – система выхлопа и система очистки воздуха; 8 – топливный бак; 9 – модуль пневматического оборудования; 10 – главные резервуары; 11 – кондиционер; 12 – кабина; 13 – тележка 14 – рама тепловоза; 15 – песочные бункера

Рисунок 28. Маневровый тепловоз на СПГ ТЭМГ1

Наименование параметра	ТЭМГ1
Мощность газопоршневого двигателя, кВт (л.с.)	428x2 (579x2)
Нагрузка от колёсной пары на рельсы, кН (тс)	220,5 (22,5)
Масса тепловоза	90±3%
Сила тяги при трогании с места, кН (тс)	291 (29,7)
Сила тяги расчетного режима, кН (тс)	216 (22)
Скорость расчетного режима, км/ч	3,08 (11,1)
Габарит по ГОСТ 9238	1-Т
Длина секции локомотива, мм	17100
Запас топлива, сут	4
Удельный расход топлива в номинальном режиме, г/кВт·ч	204
Расход газа на холостом ходу, кг/ч	5

Таблица 10. Основные характеристики маневрового тепловоза ТЭМГ1 на СПГ

На сегодняшний день компанией АО «Технология 1604» разработан двигатель (Кунгур 550 (рис.29)) на базе двигателя ЯМЗ-240. В настоящее время проходят стендовые испытания. Силовой агрегат имеет мощность 428 кВт (582

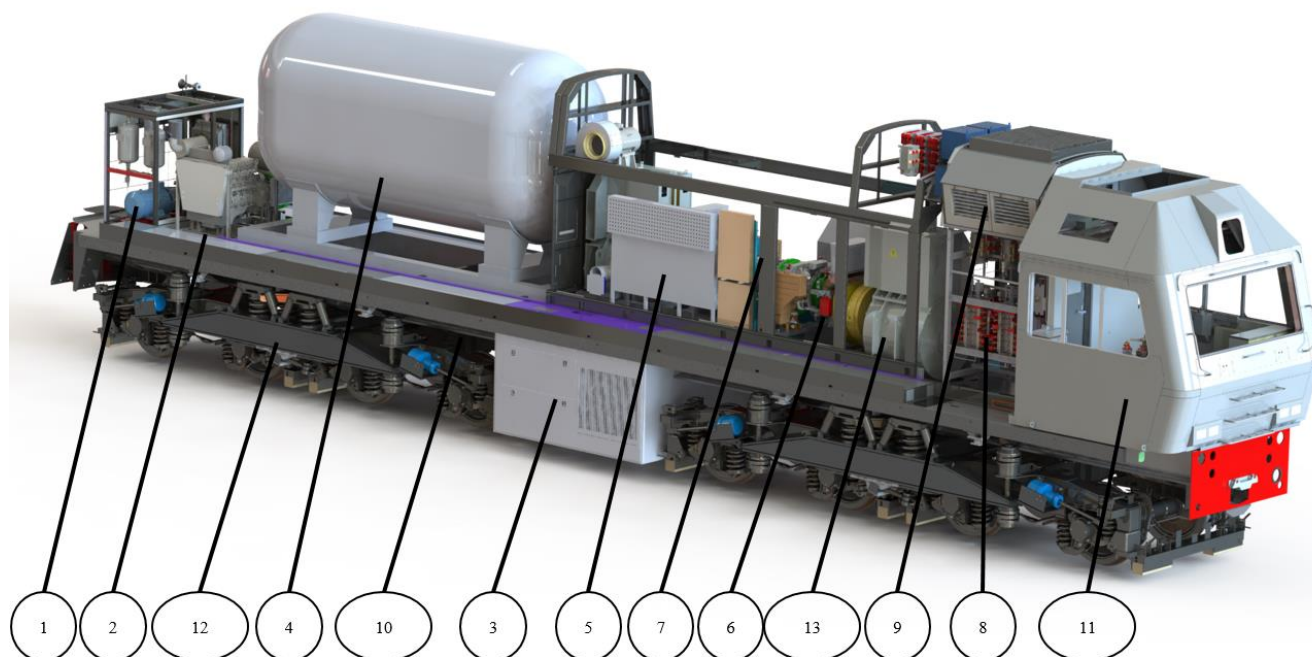
л.с.). На маневровом локомотиве ТЭМГ1 производства АО «Синара транспортные машины» будет располагаться два двигателя суммарной мощностью 856 кВт (1 164 л.с.).



Рисунок 29. Внешний вид двигателя Кунгур 550 для локомотива ТЭМГ1.

№ п/п	Наименование характеристики и комплектации	
1.	Тип	12-цилиндровый, газопоршневой
2.	Полная мощность, кВт (л.с.)	428 (582)
3.	Частота вращения коленчатого вала двигателя на полной мощности, об/мин.	1900
4.	Минимальная частота вращения холостого хода выходного вала редуктора, об/мин.	600
5.	Удельный расход топлива в режиме полной мощности, г/кВт*ч, не более	235
6.	Способ пуска двигателя	Электрический с аккумуляторных батарей
7.	Регулятор вращения	Электронный
8.	Экипировочный запас топлива локомотива, тонн/суток	2,6 / 4

Таблица 11. Основные характеристики двигателя Кунгур 550 для локомотива ТЭМГ1



1 - Компрессор с системой осушки воздуха, 2 – Вспомогательный газопоршневой двигатель с генератором на постоянных магнитах и ПСН; 3- вентилятор охлаждения тяговых электродвигателей и АКБ; 4 – Емкость СПГ; 5 – Фильтрующее устройство; 6 – ГТУ1; 7 – ГТУ2; 8 – Камера ВВК; 9 – Тормозной резистор; 10 – главные резервуары; 11– кабина; 12 – тележка; 13 – Тяговый генератор с ВУ

Рисунок 30. Маневровый тепловоз на СПГ ГТЭМ1

Наименование параметра	ГТЭМ1
Мощность газотурбинного двигателя, кВт (л.с.)	750x2 (1012x2)
Масса тепловоза	184±3%
Сила тяги при трогании с места, кН (тс)	582,12 (59,4)
Сила тяги расчетного режима, кН (тс)	431,2 (44)
Скорость расчетного режима, км/ч	10,5
Запас топлива, суток	4
Удельный расход топлива ГТУ на полной мощности, г/кВт·ч	287
Расход топлива ГТУ на холостом ходу, г/ч	30
Удельный расход топлива вспомогательной газопоршневой установкой, г/кВт·ч	198

Таблица 12. Основные характеристики маневрового тепловоза ГТЭМ1 на СПГ

На маневровывозной локомотив ГТЭМ1 предполагается установить два трехвальных газотурбинных двигателя суммарной мощностью 1 500 кВт (2 040 л.с.) производства ПАО «КАДВИ (г. Калуга). Двигатель создается на базе газотурбинного двигателя ГТД-1250.



Рисунок 31. Внешний вид двигателя ГТД-1250 для локомотива ГТЭМ1

№ п/п	Наименование характеристики и комплектации	
1.	Тип	Трехвальный, с редуктором
2.	Полная мощность, кВт (л.с.)	750 (1 020)
3.	Частота вращения вала редуктора на полной мощности, об/мин.	1 500
4.	Минимальная частота вращения холостого хода выходного вала редуктора, об/мин.	500
5.	Удельный расход топлива в режиме полной мощности, г/кВт*ч, не более	234
6.	Способ пуска двигателя	Электрический с аккумуляторных батарей
7.	Регулятор частоты роторов двигателя	Электронный
8.	Экипировочный запас топлива локомотива, тонн/суток	7 / 4

Таблица 13. Основные характеристики двигателя ГТД-1250 для локомотива ГТЭМ1

4.2. Маневровые локомотивы производства ЗАО «Трансмашхолдинг».

ЗАО «Трансмашхолдинг» организована работа по созданию маневрового газотепловоза ТЭМ29 с газовым двигателем-генератором 9ГМГ (8ГЧН26/26) мощностью 940 кВт (1 278 л.с.) производства ОАО «Коломенский завод». По

информации АО «Трансмашхолдинг» его внешний вид будет практически идентичен существующему ТЭМ19.

В настоящее время завершена сборка опытного образца двигателя-генератора, стендовые испытания планируются к проведению во II кв. 2019 г.

Сборка специализированного стенда для испытаний двигателя находится в заключительной стадии, монтаж основного технологического оборудования завершён, проводится установка системы управления и ее настройка.



Рисунок 32. Внешний вид двигателя-генератора 9ГМГ и локомотива ТЭМ19.

№ п/п	Наименование характеристики и комплектации	
1.	Тип двигателя	8-цилиндровый, газопоршневой
2.	Полная мощность, кВт (л.с.)	940 (1 278)
3.	Частота вращения коленчатого вала двигателя на полной мощности, об/мин.	1 000
4.	Минимальная частота вращения холостого хода выходного вала редуктора, об/мин.	450
5.	Удельный расход топлива в режиме полной мощности, г/кВт*ч, не более	264
6.	Регулятор вращения	Электронный
7.	Экипировочный запас топлива локомотива, тонн	4,5

Таблица 14. Основные характеристики двигателя-генератора 9ГМГ и локомотива ТЭМ19

Вместе с этим, ОАО «Коломенский завод» в инициативном порядке начал работы по совершенствованию конструкции 9ГМГ. Для снижения расхода топлива двигателя-генератора и повышения его экономичности была разработана новая крышка цилиндра с активной форкамерой. Ведется подготовка к ее производству.

Планируемый срок изготовления маневрового газотепловоза ТЭМ29 – 2019 г., завершение сертификационных испытаний – IV кв. 2020 г., начала поставок ТЭМ29 – 2021 г.