

УДК 629.426(045)

Концепция модификации магистральных грузовых тепловозов для работы по газодизельному циклу

Д. И. Прохор¹, В. В. Лысенко¹, В. В. Никитин²

¹АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Прохор Д. И., Лысенко В. В., Никитин В. В. Концепция модификации магистральных грузовых тепловозов для работы по газодизельному циклу // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 36-51. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-36-51

Аннотация

Цель: Разработка концепции модификации части парка автономных магистральных грузовых локомотивов для снижения стоимости их жизненного цикла и вредного влияния на окружающую среду.

Методы: Авторами выполнен анализ потребительских и эксплуатационных свойств, компоновочная и проектно-конструкторская проработка изменения конструкции магистральных грузовых тепловозов при их модификации для работы по газодизельному циклу. На основе опыта эксплуатации газомоторных локомотивов предложена унификация видов и оптимизация криогенногазового оборудования, вводимого в конструкцию модифицируемых тепловозов. Определены критерии и условия для проведения модификации, а также технические решения, направленные на минимизацию изменений конструктива штатного тепловоза. **Результаты:** Сформулированы задачи повышения экономичности и экологических показателей тепловозов, обоснован выбор конструкционного решения для модификации парка автономных локомотивов, выполнен анализ энергетической и экономической эффективности газодизельных локомотивов, предложены критерии отбора тепловозов для модификации, предложены конструктивные изменения при модификации тепловозов для работы по газодизельному циклу.

Практическая значимость: Предлагаемая концепция модификации автономных локомотивов позволит сократить стоимость их жизненного цикла, уменьшить выбросы продуктов сгорания топлива и минимизировать длительность и стоимость этапа переоборудования штатных дизельных локомотивов для работы по газодизельному циклу.

Ключевые слова: Автономный локомотив, тепловой двигатель, дизельное топливо, сжиженный природный газ.

Введение

Лидерство на внутреннем рынке транспортных услуг и высокая конкурентоспособность на глобальном уровне во многом обеспечиваются продуманной, результативной и эффективной стратегией научно-технологического и инновационного развития отрасли. ОАО «РЖД» сохраняет лидирующие позиции по энергоэффективности и экологичности грузовых и пассажирских перевозок среди всех видов транспорта.

Перевод парка автономных локомотивов на использование в качестве топлива природного газа позволит снизить стоимость жизненного цикла газомоторных локомотивов по сравнению с дизельными тепловозами на 8,5 % и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу в 6 раз [1–3].

Выбросы вредных веществ и углеродный след автономного подвижного состава являются физическими характеристиками одного процесса — горения топлива. Содержание вредных веществ в отработавших газах от автономного подвижного состава жестко регламентируется законодательством, стандартами и системой сертификации. Кроме того, как и любая транспортно-эксплуатирующая организация, ОАО «РЖД» стремится снизить свои эксплуатационные расходы [4].

Решение текущих задач повышения экологичности и экономичности магистральных грузовых тепловозов

Сопутствующими задачами при использовании альтернативного топлива (природного газа) является минимизация технических и экономических затрат, а также обеспечение:

- уменьшения нагрузки на окружающую среду и снижения стоимости потребляемых топливно-энергетических ресурсов;
- минимизации длительности этапа внедрения разработки;
- минимизации стоимости переоборудования действующих тепловозов с определением минимально необходимых изменений их конструкции;
- минимизации последствий административно-логистических сбоев поставки и экипировки альтернативным топливом — сохранение возможности эксплуатации в дизельном режиме.



Рис. 1. Решение задач снижения экологической нагрузки, эксплуатационных расходов и минимизации сопутствующих затрат тепловозов

С учетом этих задач на начальном этапе массового внедрения газомоторного топлива оптимальным решением будет являться выполнение модификации магистральных тепловозов для работы по газодизельному циклу [5]. Пути решения проблемы представлены на рис. 1.

Выбор оптимального конструкционного решения

В настоящее время газомоторные локомотивы могут быть представлены следующими типами: газотурбовоз, газопоршневой тепловоз, газодизельный тепловоз.

Преимущества и недостатки разных типов газомоторных локомотивов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Преимущества и недостатки разных типов газомоторных локомотивов

Тип газомоторного локомотива	Преимущества	Недостатки
Газотурбовоз	Высокая удельная мощность, поэтому одна силовая установка заменяет 3 дизеля. Низкие выбросы вредных веществ. Снижение затрат на топливо. Меньшая трудоемкость при текущих ремонтах	Относительно большой удельный выброс парниковых газов (CO_2) вследствие низкого КПД. Высокая стоимость силового блока. Высокое потребление топлива на малых мощностях силовой установки. Модификация или модернизация из штатного локомотива практически невыполнима
Газопоршневой тепловоз	Низкие выбросы вредных веществ. Самые низкие затраты на топливо из газомоторных локомотивов. Преимущество конструкции для эксплуатирующего и обслуживающего персонала	Необходима тендерная секция и ее обслуживание. Требуется проектирование и постройка на производство новых двигателей или новых локомотивов. Модификация (модернизация) из штатного возможна только при перепроектировании или полной замене двигателя на газовый
Газодизельный тепловоз	Наименьшие сроки разработки. Наименьшая стоимость разработки. Наименьшее изменение штатной конструкции тяговых секций. Низкие выбросы вредных веществ. Возможность использования только дизельного топлива. Низкие затраты на топливо. Преимущество конструкции для эксплуатирующего и обслуживающего персонала. Возможность модификации (модернизации) с собственным двигателем	Необходима тендерная секция и ее обслуживание. Сервисное обслуживание двух топливных систем. На малых позициях контроллера зачастую используется только дизельное топливо, что снижает экономическую эффективность двигателя относительно газопоршневого варианта

Вопросы экологии

За последние несколько лет требования к выбросам вредных веществ значительно ужесточились. В табл. 2 представлена динамика изменения требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автономного тягового подвижного состава.

После достижения выброса оксидов азота с отработавшими газами уровня от 9 до 12 г/кВт · ч дальнейшее снижение выбросов оксидов азота без увеличения расхода топлива только за счет рабочего процесса дизельного двигателя стало труднодостижимым. Однако применение природного газа позволяет улучшить этот показатель. ОАО «РЖД» располагает положительным опытом эксплуатации газотурбовозов ГТ1h-001, ГТ1h-002, ТЭМ19-001 на полигоне Свердловской ж. д. [6]. Экологические показатели российских газомоторных локомотивов в сравнении с аналогичными по мощности дизельными локомотивами приведены в табл. 3.

Как было зафиксировано в условиях эксплуатации, применение газомоторной техники позволяет снизить выбросы оксидов азота NO_x на 76–95 %, дымность на 60–86 %, монооксида углерода на 11–27 %.

Также следует отметить, что эксплуатация газомоторных локомотивов подтвердила:

- экономию эксплуатационных расходов по опыту эксплуатации газомоторных локомотивов — до 40 %;
- увеличение ресурса двигателя;
- сокращение времени технического обслуживания ввиду меньшего износа двигателя.

ТАБЛИЦА 2. Динамика изменения требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автономного тягового подвижного состава

Параметр	ГОСТ 24585—81	ГОСТ 51249—99 до 2000 г.	ГОСТ 51249—99 с 2000 г.	ГОСТ 33574—2016 с 2025 г.	ГОСТ 33574—2016 с 2035 г.
Оксиды азота NO_x , г/кВт · ч	29	18	12	7,4	3,81
Монооксид углерода CO, г/кВт · ч	10	6	3	3,5	3,50

ТАБЛИЦА 3. Экологические показатели российских газомоторных локомотивов в сравнении с дизельными локомотивами

Параметр	ЗТЭ116У	ГТ1h	Снижение	ТЭМ18ДМ	ТЭМ19	Снижение
Оксиды азота NO_x , г/кВт · ч	12,0	1,9	На 84 %	12,0	2,90	На 76,0 %
Монооксид углерода CO, г/кВт · ч	1,1	0,8	На 27 %	3,5	3,20	На 8,5 %
Дымность, %	6,5	0,9	На 86 %	4,7	0,19	На 96,0 %

В случае с газодизельным локомотивом уменьшение выбросов вредных веществ относительно базового двигателя будет пропорционально среднеэксплуатационному замещению дизельного топлива.

Энергетическая и экономическая эффективность

Выполненный технико-экономический анализ, учитывающий результаты работы по сети штатных и газомоторных локомотивов [7, 8], позволил определить удельную стоимость на измеритель перевозочной работы для различных видов тяги и топлива с учетом стоимости топлива и КПД локомотивов. Результаты приведены в табл. 4. Электровозная тяга в табл. 4 приведена справочно, для общего сравнения.

Результаты, приведенные в табл. 4, определялись при следующих условиях:

- стоимость сжиженного природного газа составляет 50 % стоимости дизельного топлива по сети железных дорог;
- расчеты показателей тепловозов выполнены для участка Коротчаево — Войновка — Коротчаево с поездами 6300 т [7, 8];
- показатели использования при газотурбовозной тяге приняты по результатам опытных поездок на участках Сургут — Войновка, Войновка — Сургут, Лимбей — Сургут и Сургут — Коротчаево с поездами весом 8445–9220 тонн;
- газопоршневой режим принят равным по мощности дизельному режиму;
- среднеэксплуатационный режим замещения дизельного топлива природным газом для газодизельной тяги составляет 80 % [9];
- единицы измерения удельного расхода топлива к единице выполненной работы локомотивов, принятой на железнодорожном транспорте — «на измеритель» 10^4 ткм-бр, пересчитаны в стоимость удельного расхода топлива с учетом стоимости топлива.

ТАБЛИЦА 4. Энергетическая и экономическая эффективность различных видов тяги и топлива

Вид тяги	Стоимость 1 кг топлива, руб.	Стоимость количества топлива, энергетически равного 1 кВт · ч электрической энергии, руб.	Удельная стоимость затраченного топлива на измеритель, руб/ 10^4 , ткм-бр
Дизельная	74,50	6,28	1140
Газотурбинная	37,25	2,73	1026
Газодизельная (среднеэксплуатационный режим)	47,17	3,33	769
Газопоршневая	37,25	2,73	617
Электровозная тяга (справочно)	—	4,03	461

Представленные результаты расчетов показали, что в случае газодизельного локомотива результирующий эффект от экономии на топливно-энергетических ресурсах может составить до 32 % по отношению к аналогичному дизельному тепловозу, а при газопоршневом — до 45 %.

Основные отличия природного газа от дизельного топлива, влияющие на конструкторские исполнения локомотивов

Несмотря на явные преимущества, применение природного газа на транспорте несколько осложнено его специфическими физико-химическими свойствами по сравнению с дизельным топливом, а именно: энергоемкостью (МДж/кг) и плотностью (кг/м³) [10].

Сравнение физических свойств природного газа и дизельного топлива показано в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение физико-химических свойств природного газа и дизельного топлива

Топливо	Энергоемкость, МДж/кг	Плотность, кг/м ³	Энергоемкость, МДж/м ³	Объем относительный при равной энергоемкости, ед.
СПГ	49,0 (45,4–52,6)	420	20 580	1,78
ДТ	42,7	860 (840–860)	36 722	1,00

Минимальная теплота сгорания природного газа марки «Б» по ГОСТ 56021 для двигателей внутреннего сгорания допускает значения 45,4–52,6 МДж/кг. Анализ АО «ВНИКТИ» за 2014–2020 гг. поставщиков СПГ из четырех различных регионов показал устойчивое значение 49,0 МДж/кг, что и принято при выполнении расчетов. Аналогичный параметр для дизельного топлива составляет 42,7 МДж/кг, т. е. газ обладает энергоемкостью, большей на 12 %.

Следует заметить, что данное преимущество природного газа сопряжено с рядом проблем:

- большей термической нагрузкой для деталей и узлов двигателя;
- необходимостью повышения эффективности системы охлаждения относительно базовой;
- для размещения на борту локомотива природного газа требуется почти в два раза больше объема, чем дизельного топлива при аналогичном запасе хода.

Приведенные выше отличия оказывают существенное влияние на конструкторские решения при модификации тепловозов.

Критерии отбора тепловозов для модификации

Выполненный технико-экономический анализ определил критерии отбора магистральных тепловозов для модификации на газодизельный цикл [5, 11, 12]:



Рис. 2. Общий вид магистрального газотепловоза

- остаточный срок службы после модернизации должен быть более срока окупаемости модификации;
- наличие микропроцессорной системы управления;
- наличие двух и более тяговых секций;
- возможность сохранения полноценной работы в дизельном режиме.

При этом значительному изменению будет подвергнута микропроцессорная система управления локомотива в части программного обеспечения по обработке значений параметров нового оборудования и изменения алгоритмов управления [13]. Переход от дизельного к газодизельному режиму и обратно будет выполняться автоматически по ряду критериев работы локомотива и системы диагностики, при этом возможен принудительный переход в дизельный режим.

Общий вид газотепловоза показан на рис. 2.

Тендерная секция

Работа в газодизельном цикле определяет больший расход СПГ при его меньшей плотности, чем у дизельного топлива, по этой причине магистральный газотепловоз должен иметь запас газа вне тяговых секций, на отдельной тендерной секции. Тендерная секция может быть выполнена на базе любой подходящей по длине ходовой части вагона, платформы или локомотива. Для упрощения конструкции и обслуживания тендерную секцию целесообразно выполнять необмоторенной.

Поскольку наличие тендерной секции на газотепловозе обязательно, то при проектировании должна быть использована возможность размещения на этой секции максимального количества нового оборудования, тем самым уменьшая его количество в тяговых секциях и снижая необходимость изменений в их конструкции.

От криогенной емкости с запасом СПГ в обоих направлениях должны быть расположены одинаковые комплекты криогенно-газового оборудования регазификации и понижения давления, от которых регазифицированный газ под пониженным давлением должен подаваться в тяговые секции.

Для общей безопасности и минимизации затрат указанное оборудование целесообразно располагать на открытом воздухе, так как природный газ значительно легче атмосферного воздуха и в случае утечки он будет улетучиваться в атмосферу, не создавая взрывоопасных концентраций (5–15 %). Если же криогенно-газовое оборудование тендерной секции располагать в закрытых отсеках, то их необходимо

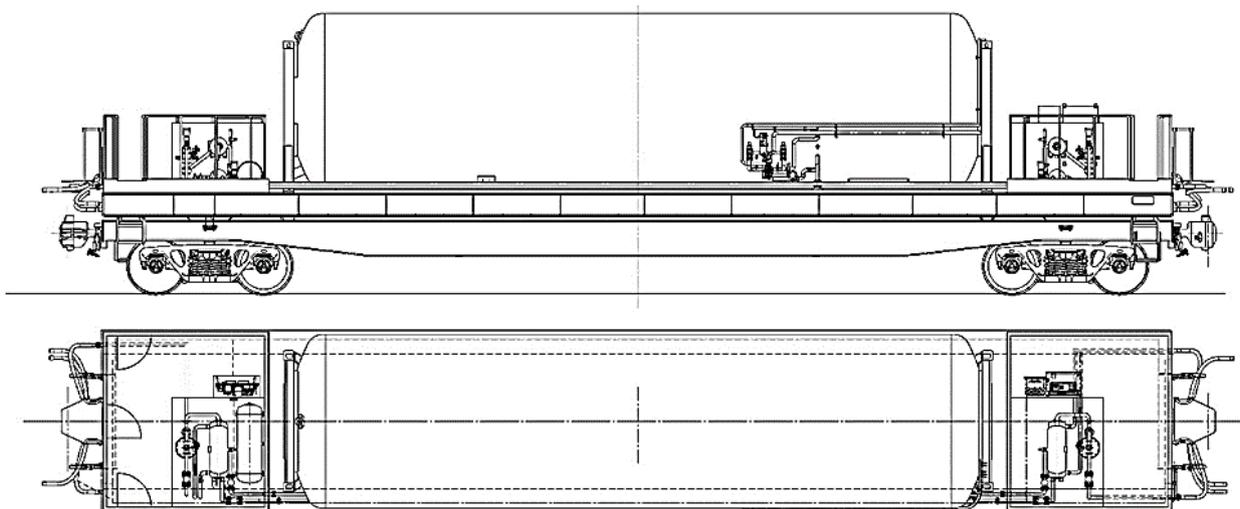


Рис. 3. Универсальная открытая тендерная секция газотепловоза

будет оборудовать системой контроля загазованности, системой пожаротушения и аварийной вентиляции, что усложнит конструкцию и увеличит ее стоимость.

Общий вид открытой тендерной секции представлен на рис. 3.

На тендерной секции целесообразно расположить:

- криогенную емкость с запасом СПГ, которая будет иметь горловины заправки и выдачи СПГ, запорно-предохранительную арматуру, устройство сброса давления в газовой подушке емкости;
- продуктовый теплообменник — для регазификации СПГ в газообразное агрегатное состояние;
- ресивер;
- фильтр газа;
- редуктор;
- запорно-предохранительную арматуру и трубопроводы, а также электроуправляемые отсечные клапаны;
- контрольно-измерительные элементы (датчики температуры и давления).

Представленный вариант газоподготовки является результатом продолжительной технической проработки, направленной на упрощение конструкции системы хранения и выдачи СПГ, увеличение ее надежности за счет отказа от сложного технического оборудования, что упростит ее техническое обслуживание и ремонт, сделает ее более универсальной и наименее затратной из возможных вариантов, а также универсальной практически для всех газотепловозов.

Дополнительное оборудование тяговых секций

Из вновь устанавливаемого оборудования непосредственно в тяговой секции требуется расположить:

- дополнительный антифризный контур отбора тепла для регазификации газа в продуктовом теплообменнике;
- дополнительные межкузовные шланговые соединения по газу и антифризу, поскольку конструктивно и технологически на тяговую секцию проще передавать уже регазифицированный газ низкого давления, а продуктовый теплообменник в этом случае целесообразно располагать на тендерной секции;
- отсечной электроуправляемый клапан;
- безопасное дренажное устройство на основе предохранительного клапана и электроуправляемого клапана, аналогичного отсечному;
- датчики обнаружения метана и устройства аварийной вентиляции (необходимая безопасность для закрытых помещений, в данном случае — машинного отделения);
- систему управления подачей топлива в двигатель с комплектом устройств подачи топлива.

Антифризный контур

Регазификация в продуктовом теплообменнике тендерной секции осуществляется за счет подвода к нему по гибким межкузовным соединениям подогретого антифриза. Поскольку СПГ в продуктовом теплообменнике имеет отрицательную температуру, необходимо использовать соответствующий теплоноситель, например антифриз, а не воду из охлаждающей системы дизеля. Антифриз должен подогреваться через отдельный небольшой теплообменник от охлаждающей жидкости дизеля. В данном случае антифризный контур гидравлически не связан с системой охлаждения тепловоза и при расцепе секций или утечках система охлаждения тепловоза не пострадает.

Система управления подачей топлива в двигатель с комплектом устройств подачи топлива

Система управления может иметь произвольную конфигурацию, но неизменную функцию: подавать в двигатель оба вида топлива в соответствии с командами системы управления высшего уровня локомотива и осуществлять диагностику и контроль рабочих параметров двигателя. Конструктивно проще подавать регазифицированный газ в цилиндры дизеля вместе с впускным воздухом, не затрагивая конструкцию самих цилиндров (крышек цилиндров). Система управления может иметь произвольную конфигурацию, но неизменную функцию: подавать в двигатель оба вида топлива в соответствии с командами системы управления высшего уровня локомотива. Ее основными элементами являются: электронный блок обработки данных и управления подачей топлива; насосы и электроуправляемые

газовые клапаны, подающие газ из газового коллектора в цилиндры или впускной воздух цилиндров; газовый коллектор, принимающий газ от системы газоподготовки; преобразователи и измерители давления впускного воздуха, масла, газа, температуры воды, выхлопных газов, измерители фазной метки распределительного газа, измерители частоты вращения.

Замещение дизельного топлива природным газом без изменения конструкции охлаждающих и выпускных устройств тепловоза

Принцип замещения дизельного топлива природным газом без изменения конструкции охлаждающих и выпускных устройств тепловоза более наглядно показан на рис. 4.

Для эффективного применения природного газа необходимо добиться максимального замещения им дизельного топлива, т. е. дизельное топливо должно расходоваться только на воспламенение газозвушной смеси.

В зависимости от базовой конструкции дизельного двигателя возможно организовать подачу газа уже с нулевой позиции контроллера. Если для этого требуется изменять конструктив и вводить дополнительные управляемые дроссельные устройства, то целесообразнее оставить конструкцию без изменений и подачу газа осуществлять со второй или третьей позиции.

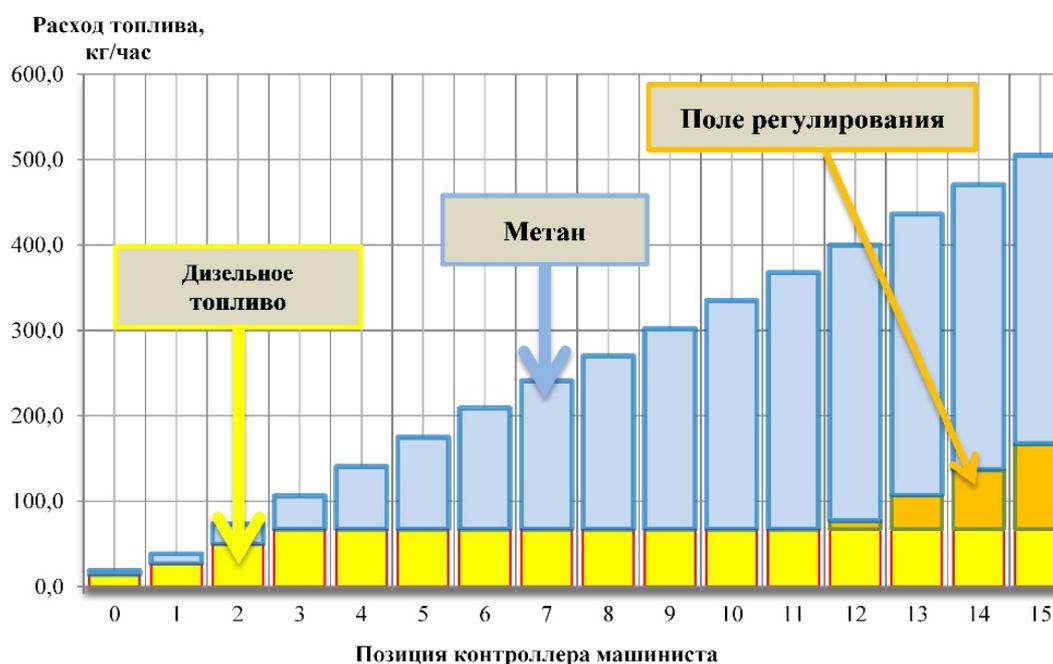


Рис. 4. Диаграмма замещения дизельного топлива (желтый цвет) природным газом (голубой цвет) с зоной регулирования (оранжевый цвет) на различных позициях контроллера машиниста

Поле регулирования замещения

В его пределах может использоваться как дизельное топливо, так и газ с различным их долевым количеством. Если на начальных и средних позициях контроллера машиниста термической прочности узлов тепловоза достаточно, то на высоких позициях имеющегося запаса может не хватать, в связи с чем можно либо изменить конструкцию системы охлаждения и выпускных устройств в сторону больших нагрузок, что концептуально неприемлемо, либо, используя систему управления, контроля и диагностики локомотива, систему управления подачи топливом и исходя из реальных условий, на которые в том числе влияют и климатические факторы, изменять процентное отношение подаваемого газа и дизельного топлива по алгоритму, обеспечивающему недостижение критических для силовой установки локомотива значений температуры и давления. Диапазон контролируемого изменения процента замещения является полем регулирования. Именно этот принцип позволит сохранить базовую конструкцию тепловоза без изменений и, согласно расчетам, получить среднеэксплуатационный коэффициент замещения дизельного топлива на уровне 80 % даже при подаче газа только с третьей позиции контроллера машиниста [9].

Среднеэксплуатационное замещение дизельного топлива магистрального газодизельного тепловоза в зависимости от веса поезда

Как показано на рис. 4, на разных позициях контроллера машиниста доля замещения дизельного топлива будет различна и значение среднеэксплуатационного замещения будет зависеть от веса поезда и профиля пути.

Тяговые расчеты, выполненные для полигонов будущей эксплуатации модифицированных газодизельных магистральных грузовых тепловозов 2ТЭ116У — Северного широтного хода и Свердловской ж. д., с поездами от 1700 до 6300 тонн в различных направлениях — показали возможность среднеэксплуатационного замещения на уровне 80 % [9]. Эта величина зависит от загрузки тепловоза и возрастает по мере увеличения веса поезда. В общем случае данная характеристика будет меняться также и при изменении профиля пути. На рис. 5 отображено изменение среднеэксплуатационного замещения дизельного топлива в зависимости от веса поезда.

Расчет кратности экипировок и изменения запаса хода

С учетом фактического запаса топлива и выполненных расчетов определена кратность экипировок сжиженным природным газом и дизельным топливом

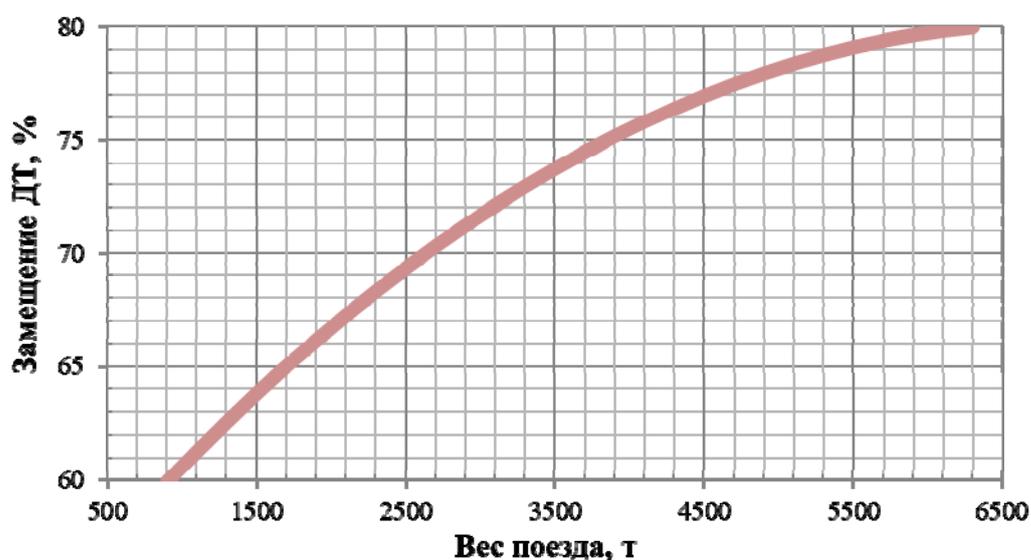


Рис. 5. Среднеэксплуатационное замещение дизельного топлива магистрального газодизельного тепловоза в зависимости от веса поезда

на примере модифицированного магистрального газодизельного тепловоза 2ТЭ116У [9, 14]. Результаты представлены в табл. 6.

Из табл. 6 следует, что в диапазоне загрузки рассматриваемого газодизельного локомотива поездами весом от 3500 до 6300 т локомотив стабильно будет иметь две экипировки природным газом на одну экипировку дизельным топливом, а при весе поездов менее 3500 т экипировки обоими видами топлива могут производиться одновременно. Данные о кратности экипировки по видам топлива позволят оптимизировать вариативность организационных и логистических мероприятий.

ТАБЛИЦА 6. Кратность экипировок топливом и увеличение запаса хода

Замещение эксплуатационное ДТ на СПГ, %	Вес поезда, т	Расход ДТ при выработке бортового запаса СПГ, т (справочно)	Количество экипировок СПГ за одну экипировку ДТ	Остаток ДТ перед экипировкой ДТ, кг	Остаток СПГ перед экипировкой ДТ, кг	Увеличение запаса хода на одной экипировке ДТ
80 : 74	6300 : 3500	4625 : 6581	2	4112 : 700	3059	в 3,8 раза
73 : 60	3500 : 900	6851 : 12349	1	6511 : 1013	1529	в 2,4 раза

Кроме того, при использовании запаса сжиженного природного газа газодизельный локомотив получает увеличение запаса хода относительно штатного дизельного локомотива. Запас хода по истощению одного бортового запаса дизельного топлива и одного запаса природного газа по отношению к базовому варианту тепловоза в среднем может быть увеличен в 1,54 раза, а с промежуточной экипировкой сжиженным газом (до истощения дизельного бака) — в 3,8 раза.

Заключение

Повышение энергетической эффективности и экологических показателей автономных грузовых локомотивов возможно при их модификации для работы по газодизельному циклу. При таком изменении конструкции можно ожидать сокращения стоимости жизненного цикла локомотивов за счет более низкой стоимости топлива, сокращения эксплуатационных расходов, увеличения ресурса двигателя и сокращения времени технического обслуживания. Замещение дизельного топлива природным газом позволит существенно снизить вредные выбросы в атмосферу, возникающие при сгорании топлива. Кроме этого, предложенная концепция переоборудования штатных дизельных локомотивов для работы как на дизельном топливе, так и на сжиженном природном газе позволит обеспечить минимальные сроки и стоимость модификации за счет сохранения преемственности основных узлов конструкции локомотива, а также простоты освоения модифицированных локомотивов эксплуатирующим и обслуживающим персоналом.

Библиографический список

1. Заручейский А. В. Использование природного газа на автономных локомотивах / А. В. Заручейский // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 5. — С. 56–58.
2. Бабков Ю. В. Газомоторное топливо для подвижного состава / Ю. В. Бабков, Д. И. Прохор // Neftegaz.RU. — 2021. — № 9. — С. 33–37.
3. Фофанов Г. А. Природный газ — моторное топливо для тепловозов / Г. А. Фофанов // Железные дороги мира. — 2006. — № 7. — С. 43–48.
4. Магистральные грузовые локомотивы, работающие на природном газе. Технические требования. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12 марта 2020 г. № 545/р. — 2020. — 174 с.
5. Прохор Д. И. Модернизация тепловозов 2ТЭ116У и ТЭМ18ДМ для работы по газодизельному циклу / Д. И. Прохор, Д. В. Котяев, А. Г. Воронков // Техника железных дорог. — 2022. — № 1(57). — С. 44–49.
6. Бабков Ю. В. Газотурбинные двигатели как силовые установки тягового подвижного состава, работающего на сжиженном природном газе / Ю. В. Бабков, Д. И. Прохор, Д. В. Котяев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 3. — С. 55–65.
7. Актуализация технико-экономического обоснования на магистральный грузовой газотурбовоз ГТ1h-002 по результатам сравнительной эксплуатации с тепловозов 3ТЭ116У. Утверждено ОАО «РЖД» 27 марта 2018 г. №274/р. — 2018. — 214 с.
8. Разработка матрицы изменения технического состояния инновационного оборудования газомоторных локомотивов на основе исследования отказов за период эксплуатации на Свердловской ж. д. — Утверждено ОАО «РЖД» от 30 декабря 2022 г. № 2540. — 2021. — 168 с.

9. Разработка модификации магистрального тепловоза 2ТЭ116У по газодизельному циклу. Технический проект 26.Т.832.00.00.000. — Коломна. 2023. — 148 с.

10. ГОСТ Р 56021—2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014. — 13 с.

11. ГОСТ Р 56878—2016. Локомотивы, работающие на сжиженном природном газе. Требования к организации эксплуатации. — М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

12. ГОСТ Р 56287—2014. Газотурбовозы магистральные грузовые, работающие на сжиженном природном газе. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2015. — 24 с.

13. Григорович Д. Н. Микропроцессорная система управления газоподготовкой для опытного газотепловоза / Д. Н. Григорович, А. Г. Иоффе // Вестник ВНИИЖТ. — 2012. — № 4. — С. 34–37.

14. ГОСТ Р 59573—2021. Пункты экипировки локомотивов, работающих на сжиженном природном газе. Требования к техническому оснащению и выбору мест расположения. — М.: Стандартинформ, 2021. — 7 с.

Дата поступления: 25.10.2023

Решение о публикации: 17.11.2023

Контактная информация:

ПРОХОР Денис Иванович — канд. техн. наук, зав. отделом газового оборудования и газовых локомотивов; prohor-di@vnikti.com

ЛЫСЕНКО Валерий Владимирович — инженер I кат. отдела газового оборудования и газовых локомотивов; lysenko-vv@vnikti.com

НИКИТИН Виктор Валерьевич — д-р техн. наук, доц., профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика»; pgups.emks@mail.ru

An Approach to Converting Mainline Freight Diesel Locomotives to Operation on a Gas-Diesel Cycle

D. I. Prokhor¹, V. V. Lysenko¹, V. V. Nikitin²

¹ JSC “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (VNIKTI, JSC), 410, Ocyabrskoy Revolutsii Str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Prokhor D. I., Lysenko V. V., Nikitin V. V. An Approach to Converting Mainline Freight Diesel Locomotives for Operation on a Gas-Diesel Cycle. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 36-51. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-36-51

Abstract

Purpose: To develop an approach to upgrading parts of a self-contained mainline freight locomotives fleet in order to reduce their life cycle cost and harmful emissions levels. **Methods:** The authors reviewed consumer

and performance characteristics, investigated the potential for changes in the layout, drawings and design of mainline freight diesel locomotives projected for conversion to operate on a gas-diesel cycle. Based on the experience with operating gas-fueled locomotives, an introduction of cryogenic gas equipment has been proposed into the design of diesel locomotives due for conversion as well as a harmonization of the equipment types and its optimization. The upgrade criteria and conditions have been defined, and some solutions to minimize the number of changes to the conventional diesel locomotive design have been put forward. **Results:** The objectives of increased cost efficiency and improved environmental performance have been specified, the design solution proposed for the self-contained diesel locomotives fleet conversion has been justified, a study of gas-diesel locomotives' energy efficiency and cost effectiveness has been performed, the criteria for selecting specific diesel locomotives for the upgrade have been proposed as well as the engineering changes to enable the conversion of diesel locomotives to operation on a gas-diesel cycle. **Practical significance:** The suggested approach to upgrading self-contained locomotives will reduce their life cycle cost, hydrocarbon emissions and minimize the duration and cost of conventional diesel locomotives conversion to operation on a gas-diesel cycle.

Keywords: Self-contained locomotive, thermal engine, diesel fuel, liquefied natural gas.

References

1. Zarucheytsky A. V. Ispol'zovanie prirodnogo gaza na avtonomnykh lokomotivakh [Use of liquefied gas on self-contained locomotives]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2008, Iss. 5, pp. 56–58. (In Russian)
2. Babkov Yu. V., Prohov D. I. *Gazomotornoe toplivo dlya podvizhnogo sostava* [Gas engine fuel for rolling stock]. *Neftegaz.RU*, 2021, Iss. 9, pp. 33–37. (In Russian)
3. Fofanov G. A. Prirodnyy gaz — motornoe toplivo dlya teplovozov [Natural gas — an engine fuel for diesel locomotives]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways]. 2006, Iss. 7, pp. 43–48. (In Russian)
4. *Magistral'nye gruzovye lokomotivy, rabotayushchie na prirodnom gaze. Tekhnicheskie trebovaniya. Utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12 marta 2020 g. № 545/r* [Mainline freight locomotives running on natural gas. Technical requirements. Approved by the order of JSC Russian Railways dated March 12, 2020 № 545/r]. 2020, 174 p. (In Russian)
5. Prokhor D. I., Kotyaev D. V., Voronkov A. G. Modernizatsiya teplovozov 2TE116U i TEM18DM dlya raboty po gazodizel'nomu ciklu. [Upgrading 2TЭ116У and ТЭМ18ДМ locomotives for a gas-diesel cycle of operation]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway Equipment]. 2022, Iss. 1(57), pp. 44–49. (In Russian)
6. Babkov Yu. V., Prokhor D. I., Kotyaev D. V. et al. Gazoturbinnyye dvigateli kak silovyye ustanovki tyagovogo podvizhnogo sostava, rabotayushchego na szhizhennom prirodnom gaze [Gas turbine engines as liquefied natural gas-fueled traction rolling stock propulsion units]. *Bulletin of Scientific Research Results* [Bulletin of scientific research results]. 2021, Iss. 3, pp. 55–65. (In Russian)
7. *Aktualizatsiya tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya na magistr'al'nyy gruzovoy gazoturboboz GT1h-002 po rezul'tatam sravnitel'noy ekspluatatsii s teplovozov 3TE116U. Utverzhdeno OAO "RZhD" 27 marta 2018 g. №274/r* [Updating the feasibility study for the main-line freight gas turbine locomotive GT1h-002 based on the results of comparative operation with 3TE116U diesel locomotives. Approved by JSC Russian Railways on March 27, 2018 № 274/r]. 2018, 214 p. (In Russian)
8. *Razrabotka matritsy izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya innovatsionnogo oborudovaniya gazomotornykh lokomotivov na osnove issledovaniya otkazov za period ekspluatatsii na Sverdlovskoy*

zh. d. *Utverzhdeno OAO "RZhD" ot 30 dekabrya 2022 g. № 2540* [Development of a matrix for changes in the technical condition of innovative equipment of gas-engine locomotives based on a study of failures during the period of operation on the Sverdlovsk railway. d. Approved by JSC Russian Railways on December 30, 2022 № 2540]. 2021, 168 p. (In Russian)

9. *Razrabotka modifikacii magistral'nogo teplovoza 2TE116U po gazodizel'nomu ciklu. Tekhnicheskij proekt 26.T.832.00.00.000* [Development of a version of the mainline diesel locomotive 2TE116U using the gas-diesel cycle. Technical project 26.T.832.00.00.000]. Kolomna, 2023, 148 p. (In Russian)

10. *GOST R 56021—2014. Gaz goryuchij prirodnyj szhizhennyj. Toplivo dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya i energeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 56021-2014. Liquefied natural fuel gas. Fuel for internal combustion engine and power generating unit. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014, 13 p. (In Russian)

11. *GOST R 56878—2016. Lokomotivy, rabotayushchie na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya k organizacii ekspluatatsii* [GOST R 56878—2016. Liquefied natural gas fueled locomotives. Operation management requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 11 p. (In Russian)

12. *GOST R 56287—2014. Gazoturbovozy magistral'nye gruzovye, rabotayushchie na szhizhennom prirodnom gaze. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 56287—2014. Mainline freight liquefied natural gas turbine locomotives. General technical requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 24 p. (In Russian)

13. Grigorovich D. N., Ioffe A. G. Mikroprocessornaya sistema upravleniya gazopodgotovkoj dlya opytnogo gazoteplovoza. [Microprocessor-based gas-conditioning control system for a gas-diesel locomotive prototype]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2012, Iss. 4, pp. 34–37. (In Russian)

14. *GOST R 59573—2021. Punkty ekipirovki lokomotivov, rabotayushchih na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya k tekhnicheskomu osnashcheniyu i vyboru mest raspolozheniya* [GOST R 59573—2021. Servicing depots for liquefied natural gas fueled locomotives. Requirements to technical facilities and locations]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 7 p. (In Russian)

Received: October 25, 2023

Accepted: November 17, 2023

Author's information:

Denis I. PROKHOR — PhD in Engineering, Head of Gas Equipment and Gas Engine Locomotives Unit; prohor-di@vnikti.com

Valeriy V. LYSENKO — Category I Engineer, Gas Equipment and Gas Engine Locomotives Unit; lysenko-vv@vnikti.com

Viktor V. NIKITIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department "Electrical and Thermal Power Engineering"; pgups.emks@mail.ru