

Г. А. Фофанов, канд. техн. наук (ВНИИЖТ)

Природный газ — моторное топливо для тепловозов

Наблюдаемое истощение разведанных запасов нефти в мире, связанное с непрерывно увеличивающимся потреблением нефтепродуктов, ставит под угрозу энергетическую безопасность многих стран. По пессимистическим прогнозам экспертов ОПЕК, собственными запасами нефти США обеспечены до 2010 г., в Великобритании они практически исчерпаны; запасов нефти в России хватит до 2021 г. Министр природных ресурсов России Ю. П. Трутнев, выступая на заседании правительства в конце 2004 г., отметил, что рентабельные запасы нефти истощатся к 2015 г. Одновременно постоянно растут цены на нефтяное топливо и увеличивается его дефицит. Это вызывает необходимость вести интенсивные работы по поиску энергоносителей, альтернативных нефтяным.

Моторные топлива, альтернативные нефтяному

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей нефтяного топлива в стране. На осуществление тяги поездов тепловозами расходуется примерно 3 млн. т дизельного топлива в год.

Снабжение тепловозов дизельным топливом осуществляется с все возрастающим напряжением в связи с постоянно увеличивающимся его дефицитом и ростом стоимости. Так, цена дизельного топлива для тепловозов с конца 2000 г. возросла с 5 тыс. до 12–14 тыс. руб. за тонну. В связи с этим возникает необходимость в обеспечении устойчивого снабжения тепловозов моторным топливом в настоящее время и в перспективе, а также в снижении расходов на его приобретение. Эту задачу в той или иной мере можно решать двумя способами: сокращением объемов потребления дизельного топлива путем повышения топливной экономичности

тепловозных силовых установок или заменой менее дефицитным и более дешевым альтернативным топливом.

Анализ показывает, что в результате совершенствования дизелей, внедрения компьютерных систем управления ими, снижения мощности вспомогательных агрегатов и ряда других мероприятий возможно повысить эксплуатационную топливную экономичность тепловозов на 7–10%. Снизить дефицит дизельного топлива можно также, расширив его фракционный состав (прибавление тяжелых фракций) или увеличив глубину переработки нефти. Однако, во-первых, нефтеперерабатывающая промышленность не решает эти задачи, а во-вторых, для тепловозов применение такого топлива связано со снижением моторесурса двигателей и дополнительными затратами на их дооборудование и эксплуатацию.

Из альтернативных видов топлива, по которым ведутся работы в России и за рубежом, можно рассмотреть природный газ, диме-

тиловый эфир, биодизель и в перспективе — водород.

Диметиловый эфир ($\text{CH}_3 - \text{O} - \text{CH}_3$) обладает хорошими моторными и, главным образом, экологическими свойствами и может быть получен из природного газа, угля, сланца и других материалов. Однако вследствие пониженной теплотворной способности, равной 6900 ккал/кг, его расход на выполнение единицы работы по сравнению с дизельным топливом (10200 ккал/кг) возрастает почти в 1,5 раза и, в конечном счете, в такой же пропорции снижается беззаправочный пробег локомотива. Низкая плотность диметилового эфира (0,66 г/см³) обуславливает необходимость значительных изменений в топливной системе тепловоза, связанных с обеспечением ее плотности и увеличением давления топлива. Стоимость диметилового эфира заметно превышает стоимость дизельного топлива.

Биодизель — топливо, основой которого является метиловый эфир, полученный из сырья растительного происхождения (рапсового, пальмового и других масел). В настоящее время ведутся исследования по его применению в основном на автотракторных дизелях в качестве добавок к стандартному топливу. Проведенными в Юго-Западном научно-исследовательском институте США (штат Техас) испытаниями дизельного топлива с добавкой 20% биотоплива марки G-3000 на тепловозном дизеле EMDGP38-2 установлено, что применять биогорючее на этом двигателе невыгодно. Однако надо отметить, что в случае его применения несколько уменьшаются вредные выбросы и снижаются потери мощности тепловоза.

Водород — топливо будущего. При исчерпании нефтяного и газового топлива конкурентом водорода будет только каменный уголь. В настоящее время стоимость получения водорода из природного газа или воды высока, но во всем мире

интенсивно ведутся работы по созданию дешевой технологии получения водорода. Не вызывает сомнения, что в ближайшее время эта задача будет решена. Применение водорода требует создания новых энергетических установок, непосредственно преобразующих его химическую энергию в электрическую. К таким установкам относится электрохимический генератор (ЭХУ) на топливных элементах; работы по их созданию широко ведутся в развитых странах мира.

Природный газ (метан) наиболее пригоден для применения на тепловозах. Более того, его энергетические и физические характеристики — повышение по сравнению с дизельным топливом примерно на 10 % массовой калорийности, снижение выбросов токсичных продуктов сгорания в 1,5–2,0 раза, уменьшение на 30–40 % воздействия на смазочные масла, приводящего к их старению, — позволяют получить более высокие экономические, экологические и ресурсные показатели работы тепловозов.

Постановлением Правительства РФ № 31 от 31 января 1993 г. установлена предельная цена за 1 м³ отпускаемого сжатого газа в размере не более 50 % стоимости 1 л бензина А-76, включая НДС, что определяет экономическую целесообразность его применения.

Кроме того, добыча природного газа более стабильна и имеет тенденцию к возрастанию. В 2005 г. предприятиями ОАО «Газпром» добыто более 530 млрд. м³ газа.

Таким образом, наиболее реальным и эффективным направлением решения проблемы устойчивого снабжения тепловозов моторным топливом, снижения расходов на его приобретение, а также повышения экологичности этих локомотивов в эксплуатации является применение природного газа. По оценкам ОПЕК, Россия обеспечена собственным запасом природного газа до 2083 г.

Технические решения

Выбор агрегатного состояния

Природный газ может находиться в двух состояниях: сжиженным (СПГ) и сжатом, т. е. компримированном (КПГ). Во всех случаях в цилиндры двигателя газ подается в сжатом виде, поэтому выбору подлежат состояния, в котором перевозится запас газа на тепловозе. В сжиженном состоянии природный газ находится при температуре минус 160 °С; для сохранения его в этом состоянии требуются криогенные емкости. При таком охлаждении плотность увеличивается почти в 600 раз, а в сжатом состоянии до давления 25 МПа (обычное давление в газовых баллонах) — в 250 раз. Следовательно, теоретически в одном и том же геометрическом объеме сжиженного газа может поместиться в 2,4 раза больше, чем сжатого. Однако на практике для сжиженного газа требуется газодводяной теплообменник с системой подачи в него горячей воды из дизеля. В связи с тепловой инерционностью теплообменника при резкопеременных режимах нагрузки тепловоза необходимо устанавливать резервную емкость для сжатого газа, что не позволяет полностью реализовать его преимущество по плотности.

Эти агрегаты, устройства автоматики управления, безопасности, а также первичный газоздушный теплообменник должны быть размещены на тепловозе. Например, в криогенном тендере тепловоза 2ТЭ116Г вместо криогенных емкостей и указанного оборудования можно установить баллоны со сжатым газом под давлением 25 МПа и разместить в них до 10 т газа. В этом же тендере может поместиться 17 т сжиженного газа, из которых почти 3 т составляет технологический запас, необходимый для обеспечения температуры его хранения. Таким образом, на тепловозе запас природного газа в сжиженном состоянии больше, чем в сжатом, практически на 25–28 %.

Кроме того, сжиженный природный газ в теплотехническом и эксплуатационном отношении является более сложным видом топлива, чем сжатый. Стоимость криогенных емкостей выше стоимости баллонов для сжатого газа. При утечках сжиженный газ либо быстро испаряется, заполняя объем тендера, либо (при больших утечках) опускается вниз, что создает опасность пожара, взрыва, отравления и ожогов обслуживающего персонала. Для получения, хранения и транспортировки сжиженного газа требуются специальное оборудование, дополнительные территории, а также квалифицированный персонал.

В процессе эксплуатации в верхней части криогенной емкости находится испарившийся газ, давление которого постепенно повышается. При давлении, определяемом прочностью емкости, газ необходимо сбрасывать в атмосферу, что ограничивает продолжительность нахождения тепловоза в закрытых помещениях, а на электрифицированных линиях создает опасность повреждения контактной сети.

Сжатый природный газ находится в состоянии, пригодном для подачи в цилиндры двигателя, но для его хранения требуется создать высокое давление, что связано с определенными трудностями в отношении уплотнения газопроводов и обеспечения безопасности эксплуатации. Кроме того, высокое давление связано с глубоким редуцированием сжатого газа.

Таким образом, каждое из агрегатных состояний имеет свои недостатки, и поэтому выбор одного из них должен соотноситься с условиями эксплуатации тепловозов.

Так, на маневровых тепловозах, где число изменений режимов работы достигает 100 в час, применять сжиженный газ затруднительно из-за инерционности газификатора, и поэтому на газотепловозах ТЭМ18Г применен сжатый природный газ. Запас его, возимый на тепловозе, составляет 850 м³ при дав-

лении 20 МПа, что обеспечивает межзаправочный срок 2,5–3,0 сут.

Для магистральных тепловозов, режимы работы которых более стабильны, но межзаправочный пробег в связи с их значительным удалением от депо играет бóльшую роль, чем для маневровых, можно рассматривать оба агрегатных состояния. Однако очевидно, что сжиженный газ имеет смысл применять только в тех регионах, где организовано его производство и значительные затраты на создание инфраструктуры газоснабжения оправданы достаточным количеством газотепловозов.

Основы конструкции газотепловоза

Возможны два варианта организации рабочего процесса тепловозного двигателя с использованием природного газа в качестве моторного топлива: первый — по газовому циклу с искровым зажиганием газозвоздушной смеси в цилиндре, второй — по газодизельному циклу при зажигании газозвоздушной смеси с помощью запальной порции дизельного топлива.

Первый вариант связан с необходимостью уменьшения степени сжатия газа в двигателе, изменения камеры сгорания, создания системы электрического зажигания; при этом уменьшается мощность и ухудшается топливная экономичность двигателя. Например, нижегородское ОАО «Румо» предлагает двигатели 6ЧН22/28 мощностью 750 кВт, имеющие в газодизельном варианте эту же мощность, а в газовом варианте — мощность, сниженную до 560 кВт (на 26%), и удельный расход топлива, увеличенный на 12%. В последнем варианте возможно полное замещение дизельного топлива газом. Однако расчеты показывают, что получаемая при этом экономия сводится на нет затратами на дополнительный расход газа, что обусловлено его повышенным удельным расходом.

Немаловажным обстоятельством является то, что при газодизельном цикле обеспечивается конвертируемость двигателя, т. е. его способность работать как на газовом, так и на дизельном топливе. Это имеет большое значение для обеспечения надежности перевозок маневровыми и магистральными тепловозами.

Простота и относительно малая стоимость переоборудования тепловозного дизеля для работы на природном газе, сохранение мощности и топливной экономичности, обеспечение надежности и удобства эксплуатации позволяют сделать вывод о целесообразности применения на тепловозных двигателях газодизельного цикла.

В соответствии с этим на газотепловозе должны быть предусмотрены емкости как для газа, так и для дизельного топлива, а также обеспечена возможность конвертирования работы дизеля простым переключением, без каких-либо добавочных операций.

Опытные образцы газотепловозов

Работы по созданию газотепловозов в нашей стране начались в конце 1980-х годов. На Луганском

тепловозостроительном заводе были построены три магистральных газотепловоза: два на базе тепловоза 2ТЭ10 и один на базе тепловоза 2ТЭ116 — соответственно 2ТЭ10Г и 2ТЭ116Г. Газотепловозы имели тендерные секции с двумя криогенными емкостями, вмещающими 17 т сжиженного природного газа. В 1991 г. были проведены теплотехнические испытания газотепловоза 2ТЭ10Г, которые выявили ряд недостатков газодизеля 10ГД100Б и регазификатора.

В дальнейшем работы по газотепловозам были приостановлены. Тепловозы 2ТЭ10Г остались в Украине и были разоборудованы. На тепловозе 2ТЭ116Г (рис. 1) отработывали электронную систему управления подачей газа в цилиндры газодизеля. Затем, в связи с низкой надежностью этой системы, газодизель-генератор 10ГДГ на секции Б этого тепловоза переоборудовали под механический привод газовых клапанов и провели его наладочные испытания.

Для отработки основных технических решений в 1994 г. был создан макетный образец маневрового газотепловоза на базе серийного локомотива ТЭМ2У, а в 1998 г. на Брянском машиностроительном заводе построены два опыт-



Рис. 1. Магистральный газотепловоз 2ТЭ116Г с криогенным тендером-вагоном



Рис. 2. Маневровый газотепловоз ТЭМ18Г и его заправка автогазозаправщиком

ных газотепловоза ТЭМ18Г (рис. 2) с газодизель-генератором ГДГ-50 Пензенского дизельного завода. В конце 2000 г. они введены в опытную эксплуатацию.

Запуск газодизеля этих тепловозов и работа в режиме малых нагрузок осуществляются на дизельном топливе, на газодизельный рабочий процесс он переходит на 4-й позиции контроллера машиниста. Запальная порция дизельного топлива составляет 15 % его общего расхода (газ + дизельное топливо). Мощность газодизеля и сила тяги тепловоза такие же, как у серийного тепловоза (соответственно 882 кВт и 318 кН при трогании). Запас газа обеспечивает беззаправочный пробег тепловоза в течение 2,5–3 сут. Удельный эквивалентный расход топлива на номинальной мощности на 3–5 % меньше соответствующего расхода при работе на дизельном топливе, токсичность выхлопных газов в 1,5–2

раза ниже. Эксплуатационные испытания на Московской железной дороге показали, что доля замещения дизельного топлива природным газом на этих газотепловозах в зависимости от рода маневровой работы составляет от 35 до 50 %. На Свердловской дороге, где в настоящее время эксплуатируется газотепловоз ТЭМ18Г-001, доля замещения при работе тепловоза на газе в 2005 г. составила 44 %. При этом расходы на приобретение моторного топлива снизились на 22 %.

В 2004 г. ОАО «Российские железные дороги», ОАО «Газпром» и правительство Свердловской области подписали программу по созданию и внедрению в опытную эксплуатацию магистральных и маневровых тепловозов на Свердловской железной дороге, работающих на природном газе.

Программа предусматривает создание опытных образцов магистрального газотепловоза 2ТЭ116Г, маневровых ТЭМ18ГБ (рис. 3), ЧМЭ3Г (рис. 4), ТЭМ2Г, а также инфраструктуры для их снабжения газом. В настоящее время ведется отработка рабочего процесса газодизель-генератора 1ГДГ для тепловоза 2ТЭ116Г, построен опытный маневровый газотепловоз ЧМЭ3 и на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа ведутся его испытания. Разрабатывается проект газотепловоза ТЭМ18Г с бустером, где располагается возимый запас газа. Это позволяет не только вдвое увеличить силу тяги при трогании и разгоне тепловоза, но и создать возимый запас газа, обеспечивающий беззаправочный пробег тепловоза в течение 12–15 сут. Во ВНИКТИ и ВНИИЖТе ведутся работы по созданию магистрального и маневрового газотурбовозов.

Работы по применению природного газа в качестве моторного топлива на тепловозах проводятся в США, Германии, Канаде, Австрии. Так, в США в 1992–1994 гг. переоборудованы для работы по газодизельному циклу два тепловоза серии SD40-2 (рис. 5) с двигате-

лями фирмы General Motors мощностью 2200 кВт и два маневровых тепловоза МК 1200с с двигателями Caterpillar мощностью 1527 кВт. В настоящее время ведутся работы по переводу на газ локомотивных двигателей EMD 645, КТАСОГ3 (Cummins).

В Германии для работы на газе переоборудован маневровый тепловоз серии K6f 360, созданы промышленные газотепловозы KG230 и МАК G1600. В Австрии построен магистральный грузовой газотепловоз GE 3000 мощностью 2200 кВт.

Совершенствование газотепловозов

В процессе опытной эксплуатации газотепловозов ТЭМ18Г выявлен ряд недостатков их конструкции, в связи с этим были разработаны предложения по совершенствованию газотепловозов, технологии их ремонта и обслуживания.

Одна из основных проблем — увеличение доли замещения дизельного топлива газом на маневровых газотепловозах. Это может быть достигнуто расширением диапазона режимов работы газодизель-генератора с использованием газового топлива. Работа на газе начиная с 4-й позиции контроллера на тепловозах ТЭМ18Г обусловлена тем, что серийная топливная аппаратура не обеспечивает устойчивую подачу запальной порции дизельного топлива (15 %) при частоте вращения коленчатого вала дизеля ниже 400 1/мин. При меньшей частоте вращения наблюдается неравномерная подача и даже пропуски подачи по циклам, что приводит к невозгоранию газа в цилиндре.

Другая проблема, требующая решения для обеспечения работы при малых нагрузке и частоте вращения, заключается в организации смесеобразования на этих режимах, когда практически отсутствует давление наддува. В 2005 г. разработаны, изготовлены и испытаны на

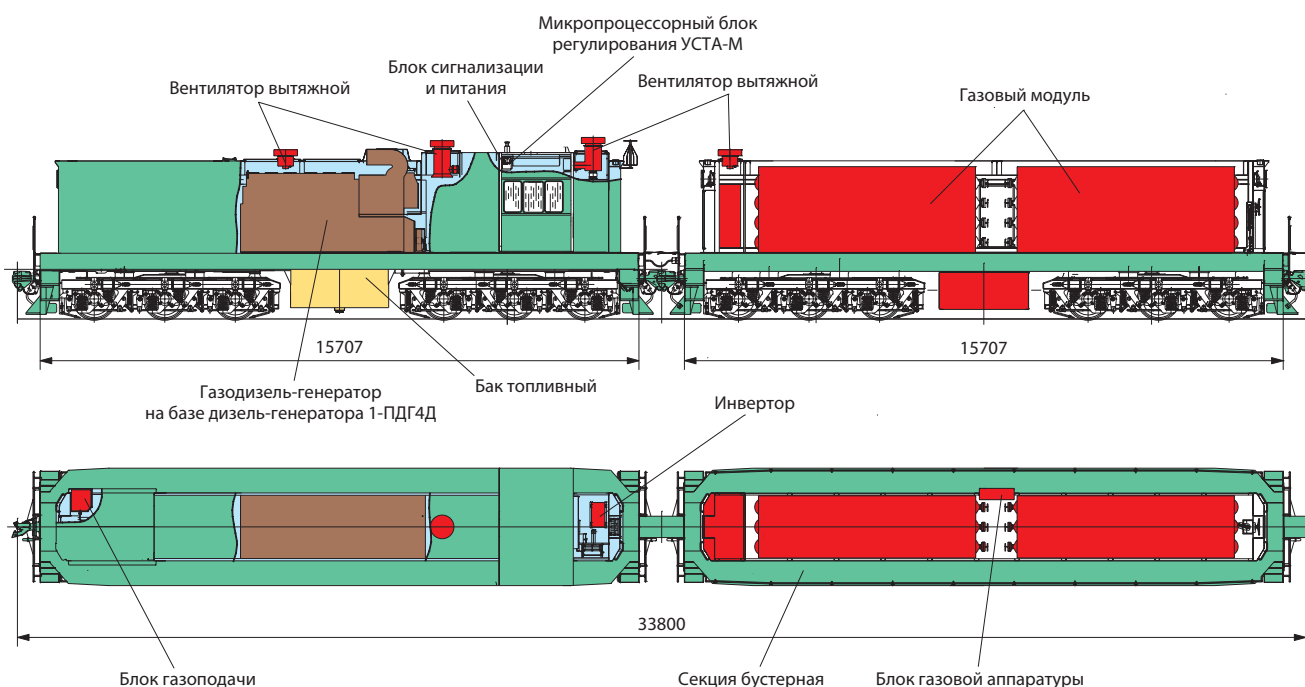


Рис. 3. Маневровый газотепловоз ТЭМ18ГБ с газобаллонной бустерной секцией

стенде комплекты форсунок, обеспечивающие устойчивую подачу запальной порции топлива при снижении частоты вращения коленчатого вала до 300 1/мин. Ожидается, что в процессе запланированных испытаний газодизеля ГДГ-50 будут определены параметры топливо- и газоподачи, обеспечивающие

работу по газодизельному циклу на 2–3-й позициях контроллера, что позволит увеличить долю замещения примерно до 60%.

Другой возможностью ее увеличения является замена дизельного топлива, используемого в качестве запального, синтез-газом, конвертируемым из природного газа на

борту тепловоза. Ведутся исследования по получению синтез-газа с цетановым числом, обеспечивающим его воспламенение от сжатия. Это позволит увеличить долю замещения дизельного топлива газом еще на 6–7%.

Одним из важных направлений совершенствования газотепловозов

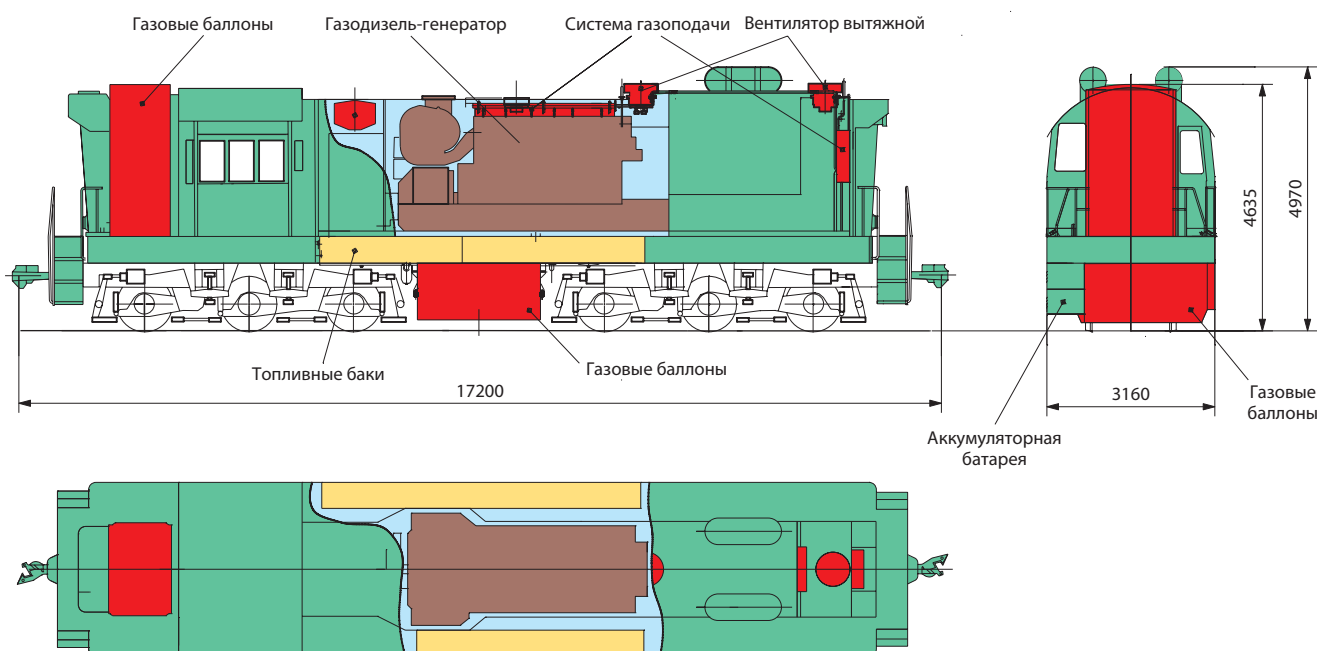


Рис. 4. Маневровый газотепловоз ЧМЭ3Г



Рис. 5. Магистральный газотепловоз SD40-2 с криогенным тендером-цистерной железной дороги Burlington Northern (США)

является разработка и внедрение электронной системы управления подачей топлива в цилиндры газодизеля. Работы по созданию такой системы для газодизель-генераторов 1ГДГ и ГДГ-50 в настоящее время ведут ОАО УК «Коломенский завод» и ВНИИЖТ. Ее применение значительно упростит переоборудование тепловозов для работы на газе и позволит автоматизировать управление подачей топлива.

О газификации тепловозов на сети железных дорог России

В 2003 г. по указанию Министерства путей сообщения был разработан проект комплексной программы, включающий мероприятия по переоборудованию тепловозов для работы на сжатом и сжиженном природном газе, газоснабжению и развитию деповского хозяйства.

На основании анализа полигонов тепловозной тяги, парка тепловозов и расположения сети газопроводов выбраны участки на 12 железных дорогах, определены

73 депо с эксплуатационным парком 1504 магистральных тепловоза (типа 2ТЭ116, 2ТЭ10) и 2089 маневровых тепловозов (серий ЧМЭЗ, ТЭМ2), которые с учетом имеющихся технических решений могут быть переведены на газомоторное топливо.

Помимо научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ и переоборудования тепловозов, предусматривается реконструкция локомотивных депо и строительство газонаполнительных компрессорных станций. Для эксплуатации магистральных и маневровых газотепловозов должно быть оборудовано 38 локомотивных депо и 29 депо только для обслуживания маневровых газотепловозов. Финансирование работ по строительству станций заправки предусматривается за счет средств ОАО «Газпром».

Стоимость работ по внедрению маневровых и магистральных газотепловозов на сети ОАО «РЖД» составляет 26 684,2 млн. руб.

Переоборудование магистральных и маневровых тепловозов для работы на газе предусмотрено осу-

ществлять при их модернизации на ремонтных заводах «Желдорремаш». После окончания модернизации для планируемого парка газотепловозов общее годовое замещение дизельного топлива будет составлять 0,9513 млн. т, а потребление газомоторного топлива — около 1,2 млрд. nm^3 в год. Указанное количество тепловозов может быть переоборудовано в течение 10 лет.

Проведенная предварительная технико-экономическая оценка показала, что затраты ОАО «РЖД» по переоборудованию локомотивов и деповского хозяйства окупятся для магистральных газотепловозов через 7 лет, для маневровых тепловозов через 5,9 года. На отдельных участках железных дорог срок окупаемости может быть существенно меньшим. Так, по расчетам УО ВНИИЖТа для конкретных участков Свердловской дороги, обслуживаемых депо Сургут и Тюмень, срок окупаемости составит не более 5 лет.

Доходы от использования газотепловозов формируются в результате снижения эксплуатационных затрат на топливо и моторные масла, а также выплат за загрязнение окружающей среды.

Оценка других вариантов газификации тепловозов показывает, что ее эффективность может быть значительно повышена при наличии собственных заправочных станций. Она основана на том, что при стоимости 60–70 коп./ m^3 газа, отпускаемого ОАО «Газпром» газозаправочным станциям, цена моторного газа для тепловозов может быть снижена в 2–3 раза.

Таким образом, газификация тепловозов позволяет обеспечить их устойчивое снабжение моторным топливом при значительной экономии средств на его приобретение, а также улучшает экологическую обстановку в районах эксплуатации газотепловозов.