

Пути решения проблемы перевода тепловозов на газообразное топливо

Е. Е. КОССОВ¹, В. В. АСАБИН², А. Г. СИЛЮТА¹, А. Н. ЖУРАВЛЕВ¹, Л. Е. КОССОВА¹

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «СамГУПС»), Самара, 443066, Россия

Аннотация. Правительство Российской Федерации поставило задачу расширения области применения газообразного топлива в народном хозяйстве. В соответствии с этой задачей разработано соглашение от 17 июня 2016 г. о сотрудничестве между ПАО «Газпром», ОАО «РЖД», АО «Группа Синара», АО «Трансмашхолдинг» в области использования природного газа в качестве моторного топлива, в котором предусмотрено производство маневровых газотепловозов и магистральных тепловозов и газотурбовозов. Эта работа является продолжением начатых в 1990-х гг. опытно-конструкторских работ по созданию, доводке и испытаниям тепловозов, использующих в качестве моторного топлива природный газ. Перевод тепловозов на газообразное топливо может осуществляться двумя путями: создание тепловозов с газопоршневыми двигателями и модернизация тепловозов существующего парка путем переоборудования дизельных двигателей этих тепловозов под использование газодизельного цикла. Приведено сравнение этих вариантов и предложены решения, позволяющие применить на тепловозах газодизельный цикл. Представлены математические модели расчета показателей работы газодизельгенераторной установки на режимах эксплуатации и отдельно процесса топливоподачи, приведены их особенности и некоторые результаты расчета. Теоретически обоснованы экспериментально определенные причины невозможности работы силовой установки по газодизельному циклу маневрового тепловоза на базе ТЭМ18 ниже четвертой позиции контроллера машиниста. Определены минимальные конструкционные изменения штатной топливной аппаратуры, необходимые для обеспечения устойчивой работы тепловоза на газообразном топливе. Проведена сравнительная оценка эффективности перевода тепловозов на газообразное топливо и определена стоимость топлива, израсходованного за час работы, в зависимости от степени замещения топлива газом при работе тепловоза в среднестатистических режимах эксплуатации.

Ключевые слова: тепловоз; природный газ; газодизельный цикл; запальная порция; газовоздушная смесь; бедность смеси; дросселирование; форсунка; гидродинамический расчет; критерий; математический эксперимент

Введение. Несмотря на конкретные приоритеты и цели, обозначенные в принятом решением Правительства РФ Программе о расширении области применения газообразного топлива в народном хозяйстве [1], и заключение соглашения от 17 июня 2016 г. о сотрудничестве между ПАО «Газпром», ОАО «РЖД», АО «Группа Синара», АО «Трансмашхолдинг» в области использования природного газа в качестве мотор-

ного топлива [2], положение дел с расширением применения газообразного топлива на железнодорожном транспорте в локомотивном комплексе практически не изменилось. Это обстоятельство объясняется тем, что перевод тепловозов на газообразное топливо путем применения газопоршневых двигателей может осуществляться только при создании новых тепловозов. Другим путем расширения области применения газообразного топлива на железнодорожном транспорте является перевод дизелей на газодизельный цикл при модернизации существующего парка тепловозов. Этот путь требует решения ряда вопросов.

Постановка задачи. В рамках выполнения Государственной программы [1] и Соглашения [2] АО «ВНИИЖТ» совместно со специалистами АО «ВНИИКИ», ООО «ППП Дизельавтоматика» и др. проводится комплекс работ по подготовке конструкторской документации на модернизацию маневрового тепловоза ТЭМ18ДМ для обеспечения его работы на природном газе и к проведению последующих пуско-наладочных испытаний.

Данная работа является логическим продолжением начатых в 1990-х гг. работ по созданию маневровых локомотивов, использующих в качестве моторного топлива природный газ. Переданные в опытную эксплуатацию в 2000–2001 гг. маневровые газотепловозы ТЭМ18Г-0001 и ТЭМ18Г-0002 реализовали газодизельный цикл при работе с четвертой по восьмую позицию контроллера машиниста [3]. С первой по третью позицию контроллера и на холостом ходу работа осуществлялась на дизельном топливе. Степень замещения дизельного топлива при этом составляла не более 50%.

Полученные результаты вызывают практический интерес, однако маневровые тепловозы до 84% времени работают на режимах малых нагрузок и холостом ходу [4]. С учетом столь низкой степени замещения дизельного топлива целесообразность применения на тепловозах газодизельного цикла ставится под сомнение. Тем не менее свыше 50% имеющегося парка тепловозов с незначительными затратами могут быть модернизированы под работу на газодизельном цикле, что придает вопросу применения газодизельного цикла

на тепловозах значительную актуальность. С целью расширения области реализации газодизельного цикла и увеличения усредненной степени замещения дизельного топлива газовым проведено значительное число научных исследований и конструкторских разработок [5–8]. Были разработаны двухрежимные охлаждаемые форсунки, различные системы подачи запального топлива, системы управления газодизельным двигателем и т. п.

Для реализации работы по газодизельному циклу на режимах эксплуатации, включая холостой ход и пуск, необходимо определить условия, гарантирующие воспламенение газовой смеси от вспышки запального топлива. В [9] имеются требования к организации работы газопоршневых двигателей, работающих по циклу Отто, но нет информации о требованиях к качеству газовой смеси и к количественным характеристикам запального топлива применительно к газодизельному циклу. Часть таких характеристик можно получить при моделировании

процессов в двигателях и сравнении их с известными результатами испытаний.

Моделирование показателей работы газодизельгенераторной силовой установки при работе в эксплуатации. Анализ экспериментальных результатов стендовых испытаний силовой установки газотепловоза ТЭМ18Г и результатов его опытной эксплуатации показал, что для обоснования реальных причин невозможности работы силовой установки по газодизельному циклу ниже четвертой позиции контроллера машиниста, а также для возможности оценки изменения качества газовой смеси за счет дросселирования воздуха на входе в двигатель необходимо детализировать описание рабочих процессов в математической модели расчета показателей работы силовой установки.

Для анализа показателей работы газодизельгенераторной установки и оценки условий использования газодизельного цикла применена разработанная ранее математическая модель расчета показателей работы дизеля 1-ПД4Д маневрового тепловоза ТЭМ18ДМ с соответствующими дополнениями на режимах эксплуатации [10].

При построении математической модели была разработана следующая расчетная схема газовой смеси (рис. 1).

Основные положения математической модели для определения показателей работы силовой установки тепловоза на режимах эксплуатации подробно изложены в [10], в настоящей статье рассмотрены некоторые особенности расчета, имеющие принципиальное значение для затрагиваемых в ней вопросов.

Дроссельная заслонка для регулирования расхода воздуха 5 в математической модели представлена в виде местного сужения (рис. 1). Считаем, что температура воздуха при изменении давления в дросселе не меняется. Перепад давлений в дросселе дополняется перепадом давления во впускном клапане. Параметры рабочего тела в конце наполнения определяются его работой при движении поршня в такте наполнения. По параметрам рабочего тела в конце наполнения определены его масса, температура и давление в начале сжатия. При расчете температуры в конце сжатия учитываются работа, связанная с перемещением поршня в такте сжатия, и работа адиабатического сжатия. Особенность представленной модели заключается в анализе изменения температуры на выходе из выпускного коллектора с учетом работы поршня во время принудительного выпуска на такте выпуска. Поэтому при расчете по нашей математической модели температура рабочего тела в выпускном коллекторе за счет работы поршня на такте выпуска всегда выше температуры на выходе из цилиндров.

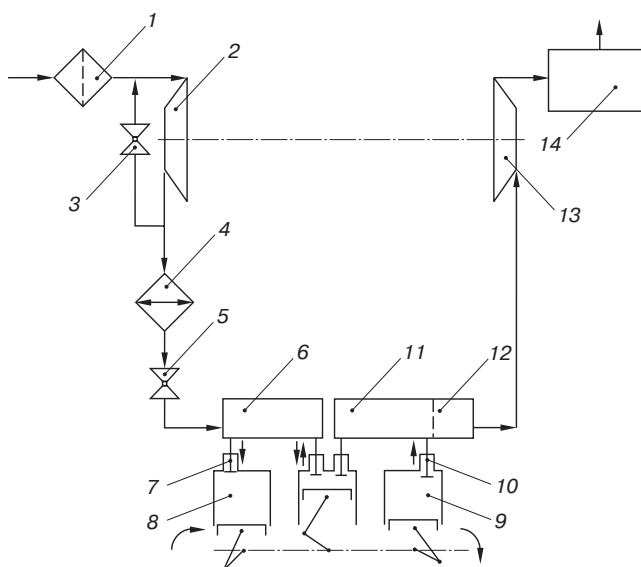


Рис. 1. Расчетная схема газовой смеси дизеля 1-ПД4Д:

- 1 — фильтр; 2 — компрессор турбокомпрессора;
- 3 — клапан перепуска воздуха на вход компрессора;
- 4 — охладитель наддувочного воздуха; 5 — дроссельная заслонка;
- 6 — впускной коллектор; 7 — впускной клапан цилиндра;
- 8 — объем цилиндра в такте наполнения; 9 — объем цилиндра в начале выпуска; 10 — выпускной клапан цилиндра;
- 11 — выпускной коллектор; 12 — выпускной коллектор после условной диафрагмы; 13 — турбина турбокомпрессора;
- 14 — глушитель

Fig. 1. Design diagram of the 1-PD4D diesel gas-air duct:

- 1 — filter; 2 — turbocharger compressor; 3 — air bypass valve to the compressor inlet; 4 — charge air cooler; 5 — throttle valve;
- 6 — intake manifold; 7 — inlet valve of the cylinder; 8 — volume of the cylinder in the intake stroke; 9 — volume of the cylinder at the beginning of the release; 10 — exhaust valve of the cylinder;
- 11 — exhaust manifold; 12 — exhaust manifold after the conventional diaphragm; 13 — turbocharger turbine; 14 — muffler

Таблица 1

Показатели работы дизеля 1-ПД4Д в зависимости от позиции контроллера машиниста

Table 1

Performance indicators of the 1-PD4D diesel engine depending on the position of the driver's controller

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Позиция контроллера машиниста							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Частота вращения коленчатого вала	рад/с	25,2	32,8	40,4	48,0	55,6	63,3	70,9	78,5
2	Эффективная мощность дизеля	кВт	42	162	282	402	522	642	762	882
3	Расход дизельного топлива	кг/с	0,0044	0,0099	0,0160	0,0210	0,0270	0,0340	0,0409	0,0483
4	Частота вращения ротора турбокомпрессора	рад/с	343	450	601	789	1013	1266	1553	1839
5	Расход воздуха	кг/с	0,39	0,50	0,61	0,74	0,91	1,10	1,30	1,63
6	Коэффициент избытка воздуха	—	7,00	3,96	3,10	2,71	2,54	2,50	2,53	2,59
7	Индикаторный КПД	—	0,32	0,44	0,48	0,49	0,50	0,50	0,49	0,48
8	Масса заряда в цилиндре	г	36,3	36,3	36,3	36,8	38,2	39,7	44,2	49,2
9	Давление во впускном коллекторе	кПа	100,1	100,0	101,4	104,0	109,6	118,0	129,0	143,4
10	Температура рабочего тела в конце расширения	К	403	504	577	630	666	686	695	704,6
11	Температура рабочего тела в выпускном коллекторе	К	473	577	652	706	741	762	766	769
12	Число работающих цилиндров	—	6	6	6	6	6	6	6	6
13	Сечение дроссельной заслонки	м ²	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
14	Цикловая подача дизельного топлива (газодизельный режим)	г/цикл	0,037	0,063	0,080	0,093	0,100	0,110	0,121	0,130
15	Цикловая подача газа (газодизельный режим)	г/цикл	0,30	0,51	0,65	0,75	0,83	0,90	0,97	1,30
16	Объемная концентрация газа	%	1,45	2,56	3,30	3,74	3,98	4,05	4,00	3,92
17	Стоимость часа работы (газодизельный режим)	руб./ч	354	789	1239	1703	2185	2696	3257	3842
18	Стоимость часа работы (дизельный режим)	руб./ч	720	1606	2520	3464	4444	5485	6625	7815

В табл. 1 показаны результаты моделирования рабочих процессов дизеля 1-ПД4Д при работе по тепловозной характеристике. По результатам расчета проводилась оценка показателей работы двигателя на газообразном топливе. Предполагалось, что при работе на газообразном топливе в целом на каждом режиме запальная порция топлива и газ в рабочем цикле выделяют такое же количество теплоты, как и при работе на дизельном топливе. Запальная порция топлива в наших расчетах принята равной 0,1 от подачи дизельного топлива при работе по газодизельному циклу. Следовательно, подача газа должна быть 0,9 подачи топлива, уменьшенной в соответствии с разницей в теплотворной способности дизельного и газообразного топлива. В расчетах условно предполагалось, что работа на газообразном топливе проис-

ходит всегда независимо от качества подачи запального топлива и состояния (бедности) газозоудной смеси. На основании расчетных показателей работы тепловозов на газообразном топливе и сравнении полученных показателей с результатами испытаний можно определить границы изменения значений некоторых показателей, определяющие стабильную работу двигателя на газообразном топливе. Например, известно, что газотепловоз ТЭМ18Г неустойчиво работает на газообразном топливе ниже четвертой позиции контроллера машиниста [3]. В качестве причины такого положения предполагалась нестабильность подачи запального топлива из-за применения штатной топливной аппаратуры. Результаты наших расчетов показывают, что это не единственная причина.

Таблица 2

**Показатели работы дизеля 1-ПД4Д на холостом ходу
в зависимости от дросселирования воздуха на входе в двигатель и числа работающих цилиндров**

Table 2

**Performance indicators of 1-PD4D diesel engine idling depending on air throttling
at the engine inlet and the number of working cylinders**

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Режимы						
			1	2	3	4	5	6	7
1	Частота вращения коленчатого вала	рад/с	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
2	Эффективная мощность дизеля	кВт	0	0	0	0	0	0	0
3	Расход дизельного топлива	кг/с	0,0020	0,0020	0,0020	0,0021	0,0021	0,0019	0,0019
4	Расход газа	кг/с	0,00160	0,00156	0,00158	0,00162	0,00163	0,00151	0,00150
5	Частота вращения ротора турбокомпрессора	рад/с	342,0	342,0	343,0	342,6	342,0	342,6	342,6
6	Расход воздуха	кг/с	0,143	0,210	0,235	0,159	0,136	0,136	0,136
7	Цикловая подача запального топлива	г/цикл	0,0170	0,0170	0,0166	0,0166	0,0166	0,0330	0,0500
8	Цикловая подача газа	г/цикл	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,26	0,39
9	Масса заряда в цилиндре	г	25,3	25,6	25,1	19,9	16,7	16,7	16,7
10	Давление в ресивере	кПа	77,1	74,6	70,4	55,6	48,8	48,8	48,8
11	Температура в цилиндре в конце расширения	К	393	384	374	417	436	562	695
12	Температура в выпускном коллекторе	К	516	499	487	585	631	612	607
13	Объемная концентрация смеси	%	0,93	0,92	0,94	1,23	1,41	2,83	4,24
14	Коэффициент избытка воздуха	—	10,6	10,7	10,5	8,0	7,0	3,5	2,3
15	Число работающих цилиндров	6	6	6	6	6	6	3	2

Примечание. Режим 1 — сечение в дросселе 0,0004 м², сечение клапанов при продувке 0,0011 м²; режим 2 — сечение в дросселе 0,0004 м², сечение клапанов при продувке 0,0008 м²; режим 3 — сечение в дросселе 0,0004 м², сечение клапанов при продувке 0,0004 м²; режим 4 — сечение в дросселе 0,0002 м², сечение клапанов при продувке 0,0004 м²; режим 5 — сечение в дросселе 0,00015 м², сечение клапанов при продувке 0,0003 м²; режим 6 — число работающих цилиндров 3 из 6; режим 7 — число работающих цилиндров 2 из 6.

Note. Mode 1 — 0.0004 m² section in the throttle, 0.0011 m² section of the valves during blowdown; mode 2 — 0.0004 m² section in the throttle, 0.0008 m² section of the valves during blowdown; mode 3 — 0.0004 m² section in the throttle, 0.0004 m² section of the valves during blowdown; mode 4 — 0.0002 m² section in the throttle, 0.0004 m² section of the valves during blowdown; mode 5 — 0.00015 m² section in the throttle, 0.0003 m² section of the valves during blowdown; mode 6 — number of working cylinders is 3 out of 6; mode 7 — number of working cylinders is 2 out of 6.

Приведенные в таблице показатели работы дизеля 1-ПД4Д удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными завода-изготовителя: начиная с третьей позиции контроллера машиниста резко снижается объемная концентрация газа в газозооной смеси (см. п. 16 табл. 1). По-видимому, отмеченная в [3] нестабильность работы дизеля на низких позициях контроллера связана не только с неудовлетворительной подачей запального топлива, но и со снижением допустимого уровня концентрации газозооной смеси. Разработанная математическая модель расчета показателей работы дизеля позволила не только имитировать его работу под нагрузкой, но и определить

показатели его работы на режимах холостого хода с уменьшенной частотой вращения коленчатого вала, а также при наличии дросселирования воздуха на входе в двигатель и при изменении числа работающих цилиндров. Некоторые результаты моделирования приведены в табл. 2.

Расчеты показали, что при отключении трех цилиндров из шести, установке сечения дросселя 1,5 см² и установке эффективного сечения при перекрытии клапанов 3,0 см² удается получить приемлемую величину бедности газозооной смеси (2,8 %) при использовании газодизельного цикла и, следовательно, устойчивое воспламенение при

работе на газообразном топливе. Также при работе на трех цилиндрах из шести необходимо обеспечить устойчивую подачу запального топлива в пределах 0,03–0,05 г на цикл.

Основными преимуществами перевода имеющегося двигателя на работу по газодизельному циклу по сравнению с заменой на газопоршневой двигатель являются минимальный объем модернизации и сохранение возможности обратного перевода тепловозов на работу на дизельном топливе. В нашей работе ставилась задача обеспечения устойчивой подачи запального топлива при минимальном изменении конструкции топливной аппаратуры. Такую задачу можно выполнить только при применении математического моделирования процессов топливоподачи.

Основой современных методов расчета процесса топливоподачи является метод, учитывающий динамические явления в нагнетательном трубопроводе. Такой метод называется гидродинамическим. В развитие метода гидродинамического расчета большой вклад внесли работы А. Пишингера [11], И. В. Астахова [12], В. Я. Натансона [13], Ю. Я. Фомина [14], Т. Ф. Кузнецова [15] и других ученых. Методы отличаются друг от друга способами составления уравнений граничных условий при решении волнового уравнения, а также числом факторов, учитываемых граничными условиями.

Как принято в большинстве расчетных методик процесса топливоподачи в дизелях, в основу расчета перемещения сжимаемой жидкости по трубопроводу положено решение телеграфного уравнения, состоящего из пары линейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих распределение потока жидкости по времени и расстоянию [8]. Для трубопровода подачи топлива в общем случае справедливы следующие уравнения:

$$Q_i = \frac{F}{a\rho} (P_{1_i} - P_0 + 2P_{2_g}), g = \left(i - \frac{L}{aZ} \right); \quad (1)$$

$$P_{1_i} = P_1 - P_0 + P_{2_g}, g = \left(i - \frac{L}{aZ} \right); \quad (2)$$

$$P_{2_i} = P_0 - P_{2_{i-1}} + P_{1_g}, g = \left(i - \frac{L}{aZ} \right), \quad (3)$$

где Q_i — расход в начале трубопровода на i -м интервале расчета, кг/с; Z — интервал расчета, с; F — сечение трубопровода, м²; a — скорость перемещения волны давления в топливе, м/с; ρ — плотность топлива, кг/м³; P_{1_i} — давление в начале трубопровода на i -м интервале расчета, Па; P_0 — начальное давление, Па; P_{2_g} — давление в конце участка трубопровода, Па; g — номер ин-

тервала; L — длина трубопровода, м; P_{2_i} — давление в конце трубопровода на i -м интервале расчета, Па; P_{1_g} — давление в начале участка трубопровода, Па; $P_{2_{i-1}}$ — давление в конце трубопровода на $i-1$ интервале расчета, Па.

Для решения уравнений необходимо определить граничные условия как в начале, так и в конце трубопровода. Как правило, определение граничных условий проводится по балансу количества рабочей жидкости, перетекающей в элементах системы, и перемещений этих элементов в течение расчетного интервала времени [11, 12, 13]. В связи с тем, что в наших расчетах поставлена конкретная задача определения устойчивой подачи запальной порции топлива, оказалось возможным упростить определение начальных условий за счет перехода от расчета количества к расчету баланса мгновенных расходов в конце расчетного интервала и приближенному определению положения перемещающихся элементов в конце расчетного интервала по скорости их движения в начале интервала.

На рис. 2 представлена принятая расчетная схема системы топливоподачи с электронной системой управления впрыском топлива (ЭСУВТ).

Разработана программа расчета показателей процесса впрыска в дизеле 1-ПД4Д при работе в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала и цикловых подач. Адекватность математической модели проверена сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на испытательных стендах ООО «ППП Дизельавтоматика». Расчеты проводились при штатной комплектации топливной аппаратуры на режимах работы под нагрузкой и на холостом ходу. На рис. 3 приведены результаты расчетов на номинальном режиме работы

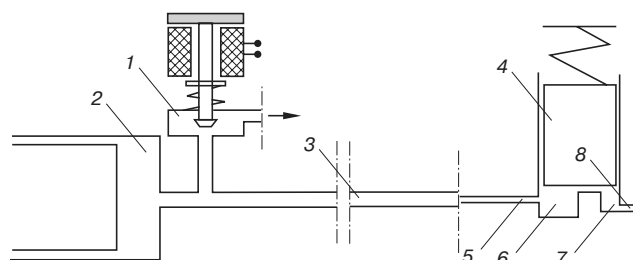


Рис. 2. Расчетная схема топливоподачи с ЭСУВТ:

- 1 — клапан управления подачей; 2 — надплунжерное пространство; 3 — нагнетательный трубопровод; 4 — игла форсунки; 5 — топливоподводящий канал в форсунке; 6 — объем под иглой форсунки до запорного конуса; 7 — объем под иглой форсунки в сопловом наконечнике; 8 — сопловые отверстия

Fig. 2. Calculated fuel supply scheme with electronic control system:

- 1 — feed control valve; 2 — over-plunger space; 3 — delivery pipeline; 4 — injector needle; 5 — fuel supply channel in the injector; 6 — volume under the injector needle up to the shut-off cone; 7 — volume under the injector needle in the nozzle tip; 8 — nozzle holes

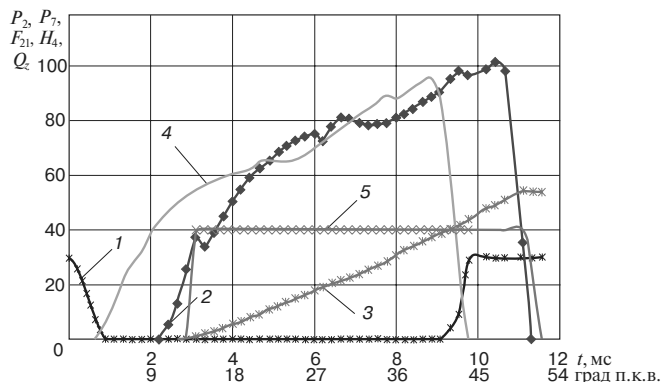


Рис. 3. Показатели процесса впрыска топлива дизеля

1-ПД4Д при работе на номинальной мощности:

1 — сечение клапана F_{21} , $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — давление в распылителе P_7 , МПа; 3 — подача топлива Q , г/цикл $\cdot 10^{-3}$; 4 — давление у насоса P_2 , МПа; 5 — перемещение иглы форсунки H_4 , $\text{мм} \cdot 10^{-2}$

Fig. 3. Indicators of the fuel injection process of the 1-PD4D diesel engine when operating at rated power:

1 — section of the valve F_{21} , $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — pressure in the sprayer P_7 , МПа; 3 — fuel supply Q , г/cycle $\cdot 10^{-3}$; 4 — pressure at the pump P_2 , МПа; 5 — displacement of the injector needle H_4 , $\text{мм} \cdot 10^{-2}$

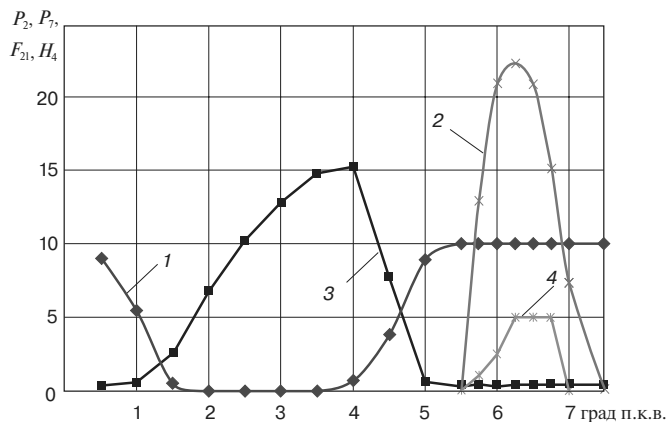


Рис. 4. Исходный процесс топливоподачи:

1 — сечение клапана F_{21} , $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — давление в распылителе P_7 , МПа; 3 — давление у насоса P_2 , МПа; 4 — перемещение иглы форсунки H_4 , $\text{мм} \cdot 10^{-2}$

Fig. 4. Initial fueling process:

1 — section of the valve F_{21} , $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — pressure in the sprayer P_7 , МПа; 3 — pressure at the pump P_2 , МПа; 4 — displacement of the injector needle H_4 , $\text{мм} \cdot 10^{-2}$

со следующими параметрами контрольного режима: частота вращения коленчатого вала 750 об/мин, эффективная мощность 882 кВт, цикловая подача 1,3 г/цикл, максимальное давление у насоса 100 МПа, максимальное давление перед сопловыми отверстиями 106 МПа, продолжительность впрыска 38 град поворота коленчатого вала (п.к.в.).

Учитывая приемлемую адекватность полученных результатов, проведен численный эксперимент по определению влияния конструктивных факторов на процесс подачи запального топлива. Для проведения

численного эксперимента выбраны конструкционные элементы и шаги их варьирования исходя из требования минимального конструкционного изменения штатной системы:

- шаг изменения сечения сопловых отверстий, мм^2 — 0,102;
- изменение максимального хода иглы распылителя, мм — 0,1;
- изменение давления начала впрыска, МПа — 5,0;
- изменение диаметра плунжера, мм — 1,0;
- изменение диаметра нагнетательного трубопровода, мм — 0,05;
- изменение объема в распылителе перед запорным конусом, см^3 — 0,4.

Выбор рациональных конструкционных элементов проводился по следующим критериям:

- устойчивость подачи запальной порции топлива K_y (определяется по относительной продолжительности положения иглы распылителя на упоре [16]);
- среднее давление в сопловом наконечнике в процессе впрыска K_p ;
- максимальная мощность тепловоза при работе на дизельном топливе K_N по отношению к максимальной мощности тепловоза до модернизации.

На рис. 4 приведен исходный процесс топливоподачи при проведении численного эксперимента со следующими параметрами контрольного режима: частота вращения коленчатого вала 240 об/мин, эффективная мощность 34,95 кВт, цикловая подача 0,17 г/цикл, максимальное давление у насоса 15,2 МПа, максимальное давление перед сопловыми отверстиями 22,3 МПа, продолжительность впрыска 0,75 град п.к.в.

Для определения критерия K_N проводился расчет процесса топливоподачи при номинальной частоте вращения коленчатого вала 750 об/мин. Продолжительность подачи выбиралась в соответствии с ограничением давления после топливного насоса в 130 МПа. Мощность дизеля рассчитывалась условно, считая удельный эффективный расход топлива постоянным (0,21 кг/кВт·ч).

На рис. 5 показан процесс топливоподачи одного из вариантов конструкционных изменений, в котором исследовалось влияние затяжки пружины иглы форсунки на процесс подачи запальной порции топлива со следующими параметрами контрольного режима: частота вращения коленчатого вала 240 об/мин, эффективная мощность 51,42 кВт, цикловая подача 0,25 г/цикл, максимальное давление у насоса 15,2 МПа, максимальное давление перед сопловыми отверстиями 23,49 МПа, продолжительность впрыска 1,75 град п.к.в. Давление начала подачи уменьшено с 25 до 15 МПа. Снижение давления начала впрыска привело к резкому улуч-

шению устойчивости процесса (от 0,75 до 1,75 град п.к.в.). При этом среднее давление впрыска не только не снизилось, а даже возросло с 18,4 до 19,9 МПа. Увеличилась величина цикловой подачи при впрыске запальной порции. Процесс впрыска запального топлива при 240 об/мин. Величина максимальной мощности дизеля при работе на дизельном топливе практически не изменилась.

В результате математического моделирования установлены конструкционные изменения, необходимые для обеспечения устойчивой подачи запального топлива при работе по газодизельному циклу. Таким образом, следует:

- уменьшить число сопловых отверстий в распылителе до четырех, располагая их рядом под углом между ними 40 град;
- уменьшить величину предварительной затяжки пружины иглы распылителя форсунки так, чтобы начало впрыска на стенде составляло 20 МПа вместо 32;
- как установлено в [16, 17], при длительной работе на газомоторном топливе необходимо применять форсунки с охлаждаемым распылителем.

Оценка эффективности способов перевода тепловозов на газообразное топливо. Сравнивались затраты на приобретение топлива для тепловозов, работающих на дизельном топливе, на смеси дизельного и газообразного топлива и на газообразном топливе. В качестве объектов рассмотрены тепловозы ТЭМ18ДМ, ТЭМ18Г, ТЭМ18ГМ (с предлагаемыми изменениями) и ТЭМ19.

На тепловозах ТЭМ18ДМ используется дизель 1-ПД4Д в чисто дизельном варианте и при применении газодизельного цикла с разной степенью замещения дизельного топлива природным газом, на тепловозе ТЭМ19 используется только газообразное топливо.

При сравнении тепловозов приняты следующие допущения:

- величина затрат на создание инфраструктуры, обеспечивающей снабжение тепловозов газообразным топливом, и подготовку депоовского хозяйства не учитывалась;
- стоимость газового оборудования и оборудования, обеспечивающего безопасность эксплуатации тепловоза, принята одинаковой для всех тепловозов.

На рис. 6 показаны результаты такой оценки.

Влияние режимов эксплуатации на стоимость топлива, израсходованного газотепловозом за час работы, незначительно. Из рисунка видно, что при степени замещения дизельного топлива 45–50 % тепловоз с газопоршневым двигателем (ТЭМ19) будет экономичнее, чем тепловоз с газодизельным. При степени замещения более 75 % тепловоз с газодизельным двигателем будет более экономичным.

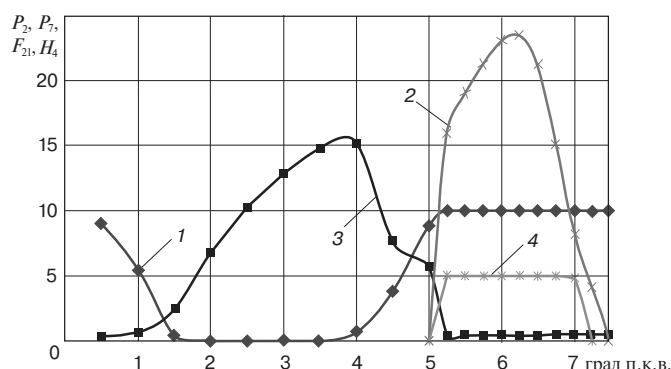


Рис. 5. Процесс впрыска запального топлива при 240 об/мин: 1 — сечение клапана F_{21} , $\text{мм}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — давление в распылителе P_7 , МПа; 3 — давление у насоса P_2 , МПа; 4 — перемещение иглы форсунки H_4 , $\text{мм} \cdot 10^{-2}$

Fig. 5. Ignition fuel injection process at 240 rpm: 1 — section of the valve F_{21} , $\text{mm}^2 \cdot 10^{-2}$; 2 — pressure in the sprayer P_7 , MPa; 3 — pressure at the pump P_2 , MPa; 4 — displacement of the injector needle H_4 , $\text{mm} \cdot 10^{-2}$

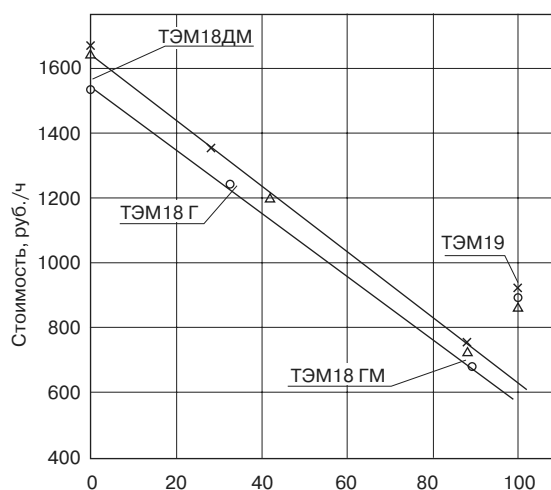


Рис. 6. Стоимость топлива, израсходованного за час работы, в зависимости от степени замещения топлива газом при работе тепловоза в среднестатистических режимах эксплуатации: $\circ$, Δ , $\times$ — 1, 2 и 3 режимы эксплуатации соответственно

Fig. 6. The cost of fuel consumed per hour of operation, depending on the degree of fuel substitution with gas when the locomotive is operating in average statistical operating modes: $\circ$, Δ , $\times$ — 1, 2 and 3 operating modes, respectively

Заключение. 1. Работа газодизелей ниже четвертой позиции контроллера не обеспечивается не только из-за нестабильной подачи запальной порции топлива, но и из-за недопустимого обеднения газозоо-душной смеси.

2. Дросселирование воздуха на входе в двигатель дает эффект снижения массы заряда в цилиндре двигателя только при высокой степени дросселирования и не позволяет плавно регулировать качество газозоо-душной смеси (бедность смеси).

3. Для работы дизеля под нагрузкой при низких позициях контроллера необходимо обеспечить не только устойчивую и качественную подачу запального топлива, но и заданную допускаемую величину бедности газозооушной смеси не ниже 3 % путем увеличения нагрузки на этих позициях.

4. Для работы дизеля на холостом ходу необходимо дросселирование воздуха на входе в двигатель до снижения давления в ресивере до 50–65 кПа и отключения не менее половины цилиндров.

5. Для обеспечения устойчивой работы тепловоза на газообразном топливе необходимы минимальные изменения штатной топливной аппаратуры, определенные в результате моделирования рабочих процессов дизеля 1-ПД4Д.

Предлагаемые решения позволяют обеспечить работу двигателя на газообразном топливе на всех эксплуатационных режимах. При таком подходе предполагается, что при мгновенном переходе с газообразного топлива на дизельное мощность тепловоза будет составлять 40 % от назначенной. Чтобы обеспечить длительную работу на полной мощности, необходимо поменять на двигателе штатные форсунки и изменить настройку системы управления впрыском топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации «Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на транспорте и техникой специального назначения» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mintras.ru/activities/gos-progs/11/13/documents> (дата обращения: 02.05.2021 г.).
2. Соглашение о сотрудничестве между ПАО «Газпром», ОАО «РЖД», АО «Группа Синара» и ЗАО «Трансмашхолдинг» в области использования природного газа в качестве моторного топлива от 17 июня 2016 г. № 75 [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?accessible=true&id=55187> (дата обращения: 02.05.2021 г.).
3. Загорский М. В., Фофанов Г. А., Поляков В. И. Газодизель-генератор ГДГ-50 на газотепловозе ТЭМ18Г производства ОАО «БМЗ» // Двигателестроение. 2001. № 4. С. 40–42.
4. Исследование условий и режимов работы маневровых тепловозов / В. О. Носков [и др.] // Молодой ученый. 2017. № 12 (146). С. 72–75.
5. Горелик Г. Б. Перспективы развития газодизельных двигателей // Вестник Томского государственного университета (Вестник ТОГУ). 2009. № 2 (13). С. 61–72.
6. Боксерман Ю. И., Мкртчян Я. С., Чириков К. Ю. Перевод транспорта на газовое топливо. М.: Недра, 1988. 220 с.
7. Патрахальцев Н. Н., Гусаков С. В., Медведев Е. В. Возможности организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием на базе дизеля 8Ч 13/14 // Двигателестроение. 2004. № 3. С. 10–13.

8. Особенности конвертации дизелей автономных локомотивов на газомоторное топливо / Д. Я. Носырев [и др.] // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (Вестник КазАТК). 2017. № 4 (103). С. 70–77.

9. ГОСТ Р 56286–2014. Локомотивы маневровые, работающие на сжиженном природном газе. Общие технические требования: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2014 г. № 1928-ст: дата введения 2015-05-01: с поправками. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.

10. Некоторые аспекты применения газомоторного топлива на дизелях тепловозов / Е. Е. Коссов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 5. С. 301–309. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-301-309>.

11. Пишингер А. О механике впрыскивания топлива под давлением // Двигатели внутреннего сгорания: сб. монографий из иностранной литературы / пер. под ред. С. Н. Васильева. М.: ОНТИ. Глав. ред. автотракт. лит., 1939. Т. V. С. 12–21.

12. Астахов И. В. Динамика процесса впрыска в быстроходных дизелях // Труды Министерства авиационной промышленности СССР (МАП). М.: Бюро новой техники, 1948. Вып. 154. 91 с.

13. Натанзон В. Я. О динамике топливной системы двигателей дизеля // Труды ЦИАМ. М.; Л.: ОНТИ. Глав. ред. авиац. лит., 1936. Вып. 20. С. 71–118.

14. Фомин Ю. Я. Гидродинамический расчет топливных систем судовых дизелей. М.: Морской транспорт, 1959. 84 с.

15. Кузнецов Т. Ф. Теоретические основы и методика расчета впрыска вязкого топлива в поршневых ДВС // Труды Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта им. С. М. Кирова (Труды ХИИЖТ). Харьков: Изд-во ХИИЖТ, 1960. Вып. 35. С. 18–29.

16. Горелик Г. Б. Неустановившиеся режимы работы дизельной топливной аппаратуры. Хабаровск: Изд-во Хабаровского гос. техн. ун-та, 1995. 91 с.

17. Крохотин Ю. М. Улучшение экономичности тепловозных дизелей путем совершенствования их топливной аппаратуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. М.: МГТУ им. Баумана, 2007. 177 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОССОВ Евгений Евгеньевич,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

АСАБИН Виталий Викторович,

канд. техн. наук, доцент, первый проректор, ФГБОУ ВО «СамГУПС»

СИЛЮТА Анатолий Геннадьевич,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, АО «ВНИИЖТ»

ЖУРАВЛЕВ Андрей Николаевич,

младший научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

КОССОВА Лидия Евгеньевна,

младший научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 21.05.2021 г., принята к публикации 22.06.2021 г.

Для цитирования: Пути решения проблемы перевода тепловозов на газообразное топливо / Е. Е. Коссов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 4. С. 191–200. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-191-200>.

Ways to solve the problem of converting diesel locomotives to gaseous fuel

Е. Е. КОССОВ¹, В. В. АСАБИН², А. Г. СИЛЮТА¹, А. Н. ЖУРАВЛЕВ¹, Л. Е. КОССОВА¹

¹Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railways" (FGBOU VO "SamGUPS"), Samara, 443066, Russia

Abstract. The Government of the Russian Federation has set the task of expanding the field of application of gaseous fuels in the national economy. In accordance with this task, an agreement of June 17, 2016 was developed on cooperation between PJSC Gazprom, JSC Russian Railways, JSC Sinara Group, JSC Transmashholding in the use of natural gas as a motor fuel, which provides for the production of shunting gas locomotives and mainline diesel locomotives and gas turbine locomotives. This work is a continuation of the work begun in the 1990s to create, fine-tune and test diesel locomotives using natural gas as a motor fuel. The conversion of diesel locomotives to gaseous fuel can be carried out in two ways: creation of diesel locomotives with gas piston engines and the modernization of diesel locomotives of the existing fleet by converting the diesel engines of these locomotives to use the gas-diesel cycle. A comparison of these options is given and solutions are proposed that allow using gas-diesel cycle on diesel locomotives. Mathematical models for calculating the performance indicators of a gas-diesel generator plant in operating modes and separately for the fuel supply process are presented, their features and some calculation results are presented. The experimentally determined reasons for the impossibility of operation of the power plant in the gas-diesel cycle of a shunting diesel locomotive based on TEM18 below the fourth position of the driver's controller are theoretically substantiated. The minimum required structural changes to the standard fuel equipment are determined, which are necessary to ensure stable operation of a diesel locomotive on gaseous fuel. A comparative assessment of the efficiency of converting diesel locomotives to gaseous fuel is carried out and the cost of fuel consumed per hour of operation is determined, depending on the degree of fuel replacement with gas when the locomotive is operating in average operating modes.

Keywords: locomotive; natural gas; gas-diesel cycle; ignition portion; gas-air mixture; poor mixture; throttling; injector; hydrodynamic calculation; criterion; mathematical experiment

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-191-200>

REFERENCES

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii "Rasshirenie ispol'zovaniya prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva na transporte i tekhnicheskoy spetsial'nogo naznacheniya" [State program of the Russian Federation "Expanding the use of natural gas as a motor fuel in transport and special equipment"] URL: <https://www.mintraz.ru/activities/gos-progs/11/13/documents> (retrieved on 02.05.2021) (in Russ.).
2. Soglasenie o sotrudnichestve mezhdru PAO "Gazprom", OAO "RZhD", AO "Gruppa Sinara" i ZAO "Transmashholding" v oblasti ispol'zovaniya prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva ot 17 iyunya 2016 g. № 75 [Agreement on cooperation between PJSC Gazprom, JSC Russian Railways, JSC Sinara Group and CJSC Transmashholding in the use of natural gas as a motor fuel dated June 17, 2016 No. 75]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?access=true&id=55187> (retrieved on 02.05.2021) (in Russ.).
3. Zagorskiy M. V., Fofanov G. A., Polyakov V. I. Gazodizel'-generator GDG-50 na gazoteplovoze TEM18G proizvodstva OAO "BMZ" [Gas-diesel generator GDG-50 on the gas-locomotive TEM18G produced by JSC "BMZ"]. Dvigatelistroyeniye, 2001, no. 4, pp. 40–42.
4. Noskov V. O., Milyutina L. V., Sinev I. S., Taruta V. F., Chubarov I. A., Chulkov A. V. Issledovanie usloviy i rezhimov raboty

manevrovyykh teplovozov [Research of conditions and operating modes of shunting diesel locomotives]. Molodoy uchenyy, 2017, no. 12 (146), pp. 72–75.

5. Gorelik G. B. Perspektivy razvitiya gazodizel'nykh dvigateley [Prospects for the development of gas-diesel engines]. Tomsk State University Journal, 2009, no. 2 (13), pp. 61–72.

6. Bokserman Yu. I., Mkrtchan Ya. S., Chirikov K. Yu. Perevod transporta na gazovoe toplivo [Transport transfer to gas fuel]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 220 p.

7. Patrakhaltsev N. N., Gusakov S. V., Medvedev E. V. Vozmozhnosti organizatsii gazodizel'nogo protsessa s vnutrennim smesobrazovaniem na baze dizelya 8Ch 13/14 [Possibilities of organizing a gas-diesel process with internal mixture formation based on diesel 8Ch 13/14]. Dvigatelistroyeniye, 2004, no. 3, pp. 10–13.

8. Nosyrev D. Ya., Kurmanova L. S., Petukhov S. A., Muratov A. V. Osobennosti konvertatsii dizeley avtonomnykh lokomotivov na gazomotornoe toplivo [Features of converting diesel engines of autonomous locomotives to gas engine fuel]. Bulletin of KazATC, 2017, no. 4 (103), pp. 70–77.

9. GOST R56286–2014. Gas-fueled shunting locomotives. General technical requirements. National Russian Federation standard. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 26, 2014 No. 1928-st. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 30 p. (in Russ.).

10. Kossow E. E., Asabin V. V., Silyuta A. G., Zhuravlev A. N., Kossova L. E. Nekotorye aspekty primeneniya gazomotornogo topliva na dizelyakh teplovozov [Some aspects of the use of gas engine fuel on diesel locomotives]. VNIIZHT Scientific Journal, 2020, Vol. 79, no. 5, pp. 301–309. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-301-309>.

11. Pishinger A. O mekhanike vpryskivaniya topliva pod davleniem [On the mechanics of fuel injection under pressure]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Sb. monografiy iz inostrannoy literatury [Internal combustion engines. Coll. of monographs from foreign literature]. Moscow, St. Petersburg, ONTI. Glav. red. avtotrakt. lit. Publ., 1939, Vol. V, pp. 12–21.

12. Astakhov I. V. Dinamika protsessa vpryska v bystrokhodnykh dizelyakh [Dynamics of the injection process in high-speed diesel engines]. Trudy M-va aviats. prom-sti SSSR (MAP) [Proceedings of the Ministry of Aviation Industry of the USSR (MAP)]. Moscow, Byuro novoy tekhniki Publ., 1948, no. 154, 91 p.

13. Natanzon V. Ya. O dinamike toplivnoy sistemy dvigateley dizelya [On the dynamics of the fuel system of diesel engines]. Trudy TsiAM [Proceedings of TsiAM]. Moscow, St. Petersburg, ONTI. Glav. red. aviats. lit. Publ., 1939, Vol. 20, pp. 71–118.

14. Fomin Yu. Ya. Gidrodinamicheskii raschet toplivnykh sistem sudovykh dizeley [Hydrodynamic calculation of fuel systems of marine diesel engines]. Moscow, Morskoy transport Publ., 1959, 84 p.

15. Kuznetsov T. F. Teoreticheskie osnovy i metodika rascheta vpryska vyazkogo topliva v porshnevnykh DVS [Theoretical foundations and methods for calculating the injection of viscous fuel in piston internal combustion engines]. Trudy KhilZht [Proceedings of KhilZht]. Khar'kov, KhilZht Publ., 1960, no. 35, pp. 18–29.

16. Gorelik G. B. Neustanovivshiesya rezhimy raboty dizel'noy toplivnoy apparatury [Unsteady operating modes of diesel fuel equipment]. Khabarovsk, Izd-vo Khabarovskogo gos. tekhn. un-ta [Khabarovsk State Technical University Publishing House], 1995, 91 p.

17. Krokhotin Yu. M. *Uluchshenie ekonomichnosti teplovoznikh dizeley putem sovershenstvovaniya ikh toplivnoy apparatury. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of diesel locomotive diesel engines by improving their fuel equipment. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2007, 177 p.

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy E. KOSSOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
JSC "VNIIZHT"

■ E-mail: Silyuta.Anatoly@vniizht.ru (A. G. Silyuta)

Vitaliy V. ASABIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, First Vice-Rector,
FGBOU VO "SamGUPS"

Anatoliy G. SILYUTA,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, JSC "VNIIZHT"

Andrey N. ZHURAVLEV,

Junior Researcher, JSC "VNIIZHT"

Lidiya E. KOSSOVA,

Junior Researcher, JSC "VNIIZHT"

Received 21.05.2021

Accepted 22.06.2021

For citation: Kossov E. E., Asabin V. V., Silyuta A. G., Zhuravlev A. N., Kossova L. E. Ways to solve the problem of converting diesel locomotives to gaseous fuel // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (4): 191–200 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-191-200>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

«PRO//Движение.Экспо»: главная железнодорожная выставка 26–29 августа 2021 г.

В этом году Салон отмечает свое 50-летие. Помимо этого, выставка вошла в план мероприятий Года науки и технологий, объявленный указом Президента Российской Федерации. «PRO//Движение.Экспо» полностью отражает тематику Года экологии, объявленную в 2021 г. в ОАО «РЖД».

Выставочная экспозиция Салона развернется на территории Экспериментального железнодорожного кольца АО «ВНИИЖТ» и займет площадь 20 000 кв.м, а производители железнодорожной техники представят более 100 натуральных образцов.

В выставке участвуют более 150 российских и иностранных компаний, в том числе производители подвижного состава, железнодорожного оборудования и комплектующих, специалисты в области строительства и обеспечения безопасности на железных дорогах, инжиниринга и дизайна, среди которых: ОАО «РЖД», Трансмашхолдинг, Группа ПТК, АО «Синара — Транспортные машины», ООО «Уральские локомотивы», НПК «Объединенная Вагонная Компания», Ассоциация «АСТО», АО «Фирма ТВЕМА», Объединенная металлургическая компания, Группа компаний 1520, АО «ЭЛАРА», «Сименс Мобильность», АО «Концерн «Уралвагонзавод», АО «Алтайвагон», концерн Knorr-Bremse, Rolls-Royce и другие.

Традиционно в рамках Салона пройдут деловые, а также тематические и развлекательные мероприятия для гостей выставки. Сессии деловой программы посвящены актуальным темам пересекающихся треков: экостратегии устойчивого развития, цифровые технологии, подвижной состав, импортозамещение, научное развитие, строительство.

«PRO//Движение.Экспо» в этом году пройдет в гибридном формате и позволит расширить географию мероприятия и охват аудитории.

26 и 27 августа участников деловой программы ждут более 10 сессий, посвященных стратегиям и технологиям устойчивого развития в железнодорожной отрасли, цифровым технологиям, развитию железнодорожного транспорта в агломерациях, транспортному машиностроению, инструментам реализации приоритетов научно-технологического развития и технологиям строительства.

В рамках «PRO//Движение.Экспо» состоится I Международная конференция «Наука 1520 ВНИИЖТ»: Загляни за горизонт».

Конференция ориентирована на обсуждение стратегических задач железнодорожной отрасли, нацелена на развитие и укрепление взаимодействия между органами власти, предприятиями отрасли, учеными, профильными университетами, производителями технических средств, разработчиками технологических решений на железных дорогах мира.

Основной фокус конференции: обсуждение перспективных железнодорожных технологий в эпоху 4-й промышленной революции и глобальных мировых вызовов.

На одной площадке соберутся ведущие российские и зарубежные эксперты и ученые, представители промышленности, органов власти.

Материалы конференции войдут в «Сборник трудов I Международной конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ»: Загляни за горизонт», который будет индексироваться в РИНЦ. Лучшие доклады по рекомендациям руководителей секций, доработанные до формата научной статьи, будут опубликованы в научно-техническом журнале «Вестник ВНИИЖТ».

Организатор конференции:

АО «ВНИИЖТ» — лидер в области разработок, создания, испытания и внедрения железнодорожной техники и технологий на пространстве колеи 1520 мм.

Более подробно об условиях участия можно узнать на официальных сайтах: <https://www.research1520.ru/>, <http://railwayexpo.ru/ru/>