

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.424.1:621.436

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-25-35

EDN: <https://elibrary.ru/yseizx>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

И. Л. Поварков¹✉, В. А. Рыжов², М. Е. Калугин², А. Н. Журавлев¹¹Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация²Коломенский завод,
Коломна, Московская область, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Система воздухообеспечения дизеля предназначена для увеличения подачи воздуха в поршневую часть двигателя, что позволяет повысить его мощность. Система включает агрегат наддува (турбокомпрессор) и охладитель наддувочного воздуха. Поскольку связь их с поршневой частью газовой смеси, это ограничивает диапазон режимов экономичной работы дизеля. В последние годы для повышения топливной эффективности дизеля доводка системы воздухообеспечения велась в направлении повышения коэффициента полезного действия турбокомпрессора и расширения диапазона его экономичной работы. В настоящее время эти резервы исчерпаны. В статье предлагается новое направление повышения топливной эффективности тепловозных дизелей в эксплуатации: управление двумя агрегатами наддува (регистрационный наддув) путем последовательного включения каждого для работы дизеля на каждом из двух мощностных режимов — ниже и выше средней мощности.

Материалы и методы. Приведена схема воздухообеспечения дизеля с регистрационной системой наддува и дана методика графоаналитического расчета совместной работы агрегатов наддува с поршневой частью двигателя.

Результаты. Обоснованы и выбраны пути повышения топливной экономичности тепловозных дизелей в эксплуатации за счет улучшения характеристик системы воздухообеспечения на режимах ниже средних мощностных. Расчетно-экспериментальным методом получена оценка повышения топливной эффективности тепловоза 2ТЭ25К, оборудованного дизелем с регистрационной системой наддува, по сравнению со штатным дизель-генератором 21-26ДГ.

Обсуждение и заключение. Практика создания, исследования и реализации регистрационных систем наддува на АО «Коломенский завод» и за рубежом показала, что, несмотря на сложность конструкции, применение таких систем целесообразно, поскольку они обеспечивают существенное увеличение эффективности силовой установки в эксплуатации. Рекомендуется проверить характеристики тепловозного дизеля с предлагаемой регистрационной системой воздухообеспечения на стендовом дизель-генераторе с последующей эксплуатационной проверкой на тепловозе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловозный дизель, система воздухообеспечения, агрегаты наддува, турбокомпрессор, регистрационная система наддува, графоаналитический расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Поварков И. Л., Рыжов В. А., Калугин М. Е., Журавлев А. Н. Совершенствование системы воздухообеспечения тепловозных дизелей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 1. С. 25–35. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-25-35>.

Original article

UDK 629.424.1: 621.436

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-25-35

EDN: <https://elibrary.ru/yseizx>



IMPROVEMENT OF THE AIR SUPPLY SYSTEM FOR DIESEL LOCOMOTIVES

Igor L. Povarkov¹✉, Valeriy A. Ryzhov², Mikhail E. Kalugin², Andrey N. Zhuravlev¹

¹Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

²Kolomensky Zavod,
Kolomna, Moscow region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The diesel air supply system is designed to increase the air supply to the piston part of the engine, which increases its power. The system includes a supercharging unit (turbocharger) and an aftercooler. As their connection with the piston part is gas-air, this limits the range of feasible operation of the diesel engine. In recent years, the development of the air supply system, which is contributed to the improvement of the fuel efficiency of the diesel engine, is aimed at increasing the turbocharger efficiency and expanding its feasible operation range. The article proposes a new way of improving the fuel efficiency of diesel locomotives: control of two supercharging units (registered supercharging) by successively switching on each for diesel operation in each of the two power modes — below and above average power.

Materials and methods. A diagram of the diesel engine air supply with a registered supercharging system is given, and a method for graph-analytical computation of the combined operation of supercharging units with the piston part of the engine is given.

Results. The authors substantiated and selected ways of increasing the fuel efficiency of diesel locomotives in operation by improving the characteristics of the air supply system at modes below average power. The calculation and experimental method gave an estimate of the increase in the fuel efficiency of a 2TE25K diesel locomotive equipped with a diesel engine with a registered supercharging system, compared with a standard 21-26DG diesel generator.

Discussion and conclusion. The practice of creating, researching and implementing registered supercharging systems at JSC Kolomensky Zavod and abroad shows that, despite the complexity of the design, such systems give a significant increase in the efficiency of the propulsion system in operation. It is recommended to check the characteristics of a diesel locomotive with the proposed registered air supply system on a bench diesel generator, followed by an operational check on a diesel locomotive.

KEYWORDS: locomotive diesel engine, air supply system, supercharging units, turbocharger, registered supercharging system, graph-analytical computation

FOR CITATION: Povarkov I. L., Ryzhov V. A., Kalugin M. E., Zhuravlev A. N. Improvement of the air supply system for diesel locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(1):25-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-25-35>.

✉ povarkov.igor@vniizht.ru (I. L. Povarkov)

© Povarkov I. L., Ryzhov V. A., Kalugin M. E.,
Zhuravlev A. N., 2023

Введение. Длительная эксплуатация на наших тепловозах дизелей Д49 и 10Д100 выявила ряд недостатков, связанных прежде всего с изменением теплотехнического состояния дизеля и его агрегатов наддува при работе с разными нагрузками, что приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик. Об этом свидетельствуют увеличение дымности газов и нагароотложений в выпускном тракте, снижение топливной экономичности и надежности ряда узлов дизеля, ухудшение экологических показателей, увеличение расходов на проведение обслуживаний и ремонтов. В связи с этим важное значение имеют работы, направленные на снижение разброса эксплуатационных характеристик дизеля за счет стабилизации его теплотехнического состояния в эксплуатации [1].

В последние годы дизелестроительные компании и научно-исследовательские институты выполнили комплекс работ по повышению уровня теплотехнического состояния тепловозных дизелей. Результаты этих работ позволили модернизировать заметную часть парка тепловозов. Это касается установки дизелей типа Д49 нового поколения на тепловозы 2ТЭ10МК и 2М62УК, применения на дизелях электронных систем управления подачи топлива и регулирования частоты вращения вала, высокоэффективных агрегатов наддува.

Внедрение приведенного комплекса усовершенствований повысило топливную экономичность тепловозов и улучшило их экологические показатели.

Вместе с тем опыт эксплуатации тепловозов показывает, что при работе дизеля на частичных нагрузках удельный расход топлива заметно возрастает. Одна из причин этого связана с особенностью системы воздухообеспечения дизелей с высоким газотурбинным наддувом, для которой характеристики агрегатов наддува рассчитываются для обеспечения экономичной работы на режиме полной мощности. Поскольку агрегаты наддува имеют газозоветную связь с поршневой частью двигателя, то при снижении мощности дизеля ниже средней турбокомпрессор практически не увеличивает расход воздуха, так как существенно снижается давление выхлопных газов и наддувочного воздуха.

Целью исследования является обоснование и выбор направлений повышения топливной эффективности тепловозных дизелей за счет совершенствования схем системы воздухообеспечения.

Анализ систем воздухообеспечения дизелей. Схемы системы воздухообеспечения основных типов тепловозных дизелей приведены на рис. 1.

В настоящее время на всех отечественных и зарубежных тепловозах применяются дизельные двигатели с газотурбинным наддувом и охлаждением

наддувочного воздуха. Большая часть дизелей четырехтактного типа.

Практически все системы воздухообеспечения четырехтактных дизелей имеют одноступенчатый наддув, для которого применяется один (рис. 1, а) или два (рис. 1, б) параллельно работающих турбокомпрессора. Также в систему входит охладитель наддувочного воздуха, после которого воздух поступает в поршневую часть дизеля.

В системах воздухообеспечения двухтактных дизелей используется двухступенчатый наддув. В качестве первой ступени применяются один (рис. 1, д) или два (рис. 1, е и з) параллельно работающих турбокомпрессора. Вторая ступень наддува — приводной компрессор центробежного (рис. 1, е) или объемного (рис. 1, з) типа. На дизеле GMC-710G (рис. 1, д) в качестве второй ступени наддува используется турбокомпрессор, который с помощью обгонной муфты соединяется с коленчатым валом дизеля.

Во всех системах воздухообеспечения тепловозных дизелей применяются турбокомпрессоры с компрессорными ступенями центробежного типа. Турбинные ступени этих агрегатов наддува в основном осевого типа. В последние годы в турбокомпрессорах начали применять турбины центробежного типа [2]. Это стало возможным благодаря разработке современных технологических процессов производства высокоэффективных конструкций таких турбин. Газовоздушное соединение агрегатов наддува с дизелем на всех типах четырехтактных дизелей последовательное и рассчитано на режим полной мощности двигателя.

Преимуществом системы наддува с одним турбокомпрессором является простота конструкции, невысокие затраты на обслуживание, ремонт и расход запчастей. Также реже отмечается помпаж компрессорной ступени. Недостаток системы заключается в инерционности ротора турбокомпрессора, что требует большего времени на его разгон и замедляет набор нагрузки дизелем.

Система наддува с двумя параллельно работающими турбокомпрессорами имеет лучшие динамические характеристики двигателей при наборе нагрузки. Ее недостатки связаны с усложнением конструкции и увеличением суммарных весогабаритных показателей агрегатов. Требуются большие затраты на обслуживание, ремонт и расход запчастей. Чаще отмечается помпаж турбокомпрессоров, связанный с рассогласованием проходных сечений сопловых аппаратов агрегатов.

Технико-экономические характеристики систем наддува с одним и двумя параллельно работающими турбокомпрессорами близки между собой, поскольку КПД современных агрегатов одинаков.

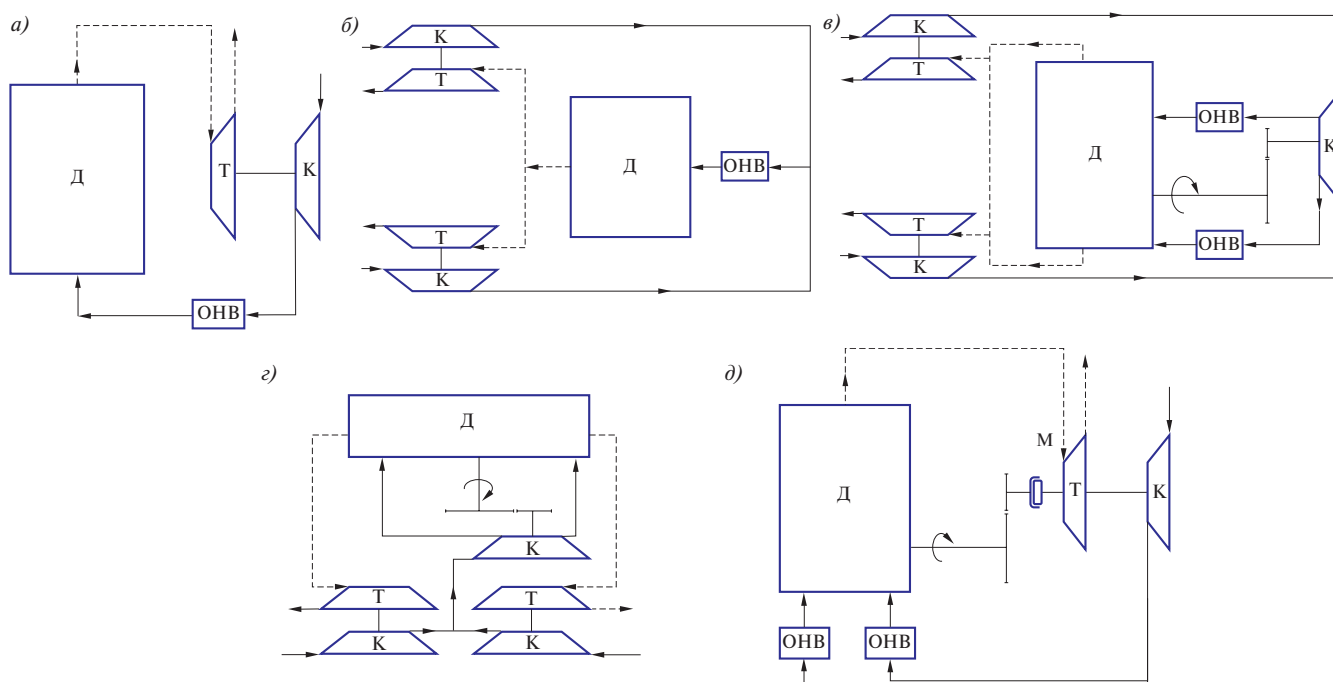


Рис. 1. Схемы системы воздухообеспечения основных типов тепловозных дизелей: четырехтактных Д49, GEVO12, W6L20LA (а), 8DM21/21, QST30-G5 (б) и двухтактных 10D100 (в), 14D40 (г), GMC-710G (д): Д — дизель; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха; Т — турбинная ступень турбокомпрессора; К — компрессорная ступень турбокомпрессора или приводного нагнетателя; М — обгонная муфта

Fig. 1. Block diagrams of the air supply system for main type diesel locomotives: four-cycle D49, GEVO12, W6L20LA (a), 8DM21/21, QST30-G5 (b) and two-cycle 10D100 (v), 14D40 (g), GMC-710G (d): Д — diesel engine; ОНВ — aftercooler; Т — the turbine stage of the turbocharger; К — the compressor stage of the turbocharger or drive supercharger; М — overrun clutch

Направления совершенствования конструкции системы воздухообеспечения дизелей. Основными компонентами системы воздухообеспечения являются агрегаты наддува, их конструктивные особенности и характеристики в значительной степени определяют мощностные, энергоэффективные и ресурсные показатели работы дизелей [3].

Подробный анализ характеристик агрегатов наддува тепловозных дизелей и обоснование направлений повышения их эффективности приведены в работе [4]. Отмечено, что в 1990-х гг. основными направлениями в развитии агрегатов наддува являлись повышение их КПД и расширение диапазона экономичной работы.

За прошедший период времени отечественные компании ООО «СКБТ», АО «Коломенский завод» и АО «Пензадизельмаш» освоили производство турбокомпрессоров с высокими значениями КПД (66–67 %) [5], соответствующими уровню лучших мировых образцов в турбостроении. Так, например, КПД компрессорной ступени турбокомпрессора ТК35В-36 тепловозного дизель-генератора 18-9ДГ, достигающий 81 %, обеспечивается при степени повышения давления наддувочного воздуха в диапазоне от 1,5

до 3,0 и в области изменения расхода воздуха от 4,3 до 5,0 кг/с.

На тепловозных дизелях устанавливаются охладители наддувочного воздуха водовоздушного типа, тепловая эффективность охладителей на дизелях Д49 достигает 0,92 [6].

В последние годы для совершенствования системы воздухообеспечения тепловозных дизелей были проведены исследования по выбору способов регулирования агрегатов наддува, обеспечивающих эффективную работу с поршневой частью двигателя на режимах нагружения.

Одно из направлений связано с перепуском наддувочного воздуха в газовый коллектор и подводом мощности к ротору турбокомпрессора от высокооборотного электродвигателя [7]. Для высокофорсированных тепловозных дизелей со средним эффективным давлением 1,6–2,3 МПа перспективной является система наддува с высокооборотным электрическим мотор-генератором и автоматическим регулированием давления наддува. При этом целесообразно использовать один турбокомпрессор и мотор-генератор, мощность которого составляет 1,0–1,5 % от номинальной мощности дизеля [7]. Применение такой системы

наддува позволяет уменьшить удельный расход топлива при работе на эксплуатационных режимах, но не более чем на 0,7 %.

Известны также направления совершенствования системы воздухообеспечения дизелей за счет применения в схеме наддува силовой турбины, перепуска газов в выпускной патрубок за турбину и перепуска воздуха с компрессора на турбину [7, 8], турбины с регулируемым сопловым аппаратом.

Недостатки приведенных способов регулирования агрегатов наддува связаны с усложнением конструкции дизеля, а также с применением регулирующих органов — заслонок, лопаток соплового аппарата, работающих в среде наддувочного воздуха и выпускных газов.

Многолетний опыт эксплуатации отечественных тепловозных дизелей показал, что наиболее надежны и эффективны системы воздухообеспечения с минимальным количеством ступеней наддува (одноступенчатый наддув от турбокомпрессора) и простой связью агрегатов наддува с дизелем (последовательное соединение турбокомпрессора, охладителя наддувочного воздуха с поршневой частью двигателя). Поэтому основным направлением дальнейшего развития системы воздухообеспечения является повышение эффективности и надежности каждого агрегата и системы в целом.

Схема системы воздухообеспечения тепловозного дизеля повышенной эффективности. Серьезным недостатком одноступенчатых систем наддува является снижение их эффективности на режимах ниже 50 % мощности дизеля из-за падения энергии выпускных газов. При работе на этих режимах агрегаты наддува практически не подают дополнительный воздух. Вместе с тем эти режимы занимают около половины времени работы дизелей магистральных тепловозов, а для маневровых являются основными. Отсюда следует, что дополнительные резервы повышения экономичности двигателей в эксплуатации могут быть реализованы за счет улучшения характеристик системы воздухообеспечения на режимах ниже средних мощностных. Одним из них является применение в схеме системы воздухообеспечения двух турбокомпрессоров, каждый из которых обеспечивает наиболее экономичную работу дизеля на любом из режимов ниже и выше 50 % полной мощности. Поскольку каждый турбокомпрессор рассчитан для работы на своем режиме, то характеристики двух агрегатов различны, в том числе по мощности, расходу воздуха и другим параметрам. Такие системы регистрового наддува с последовательным включением одного и отключением второго агрегата применяются на отечественных [8] и зарубежных [9] двигателях. Так, в последней работе показано, что за счет подключения/отключения одного из двух турбокомпрессоров при работе двигателя на частичных нагрузках топливная экономичность улучшается примерно на 2,5 %.

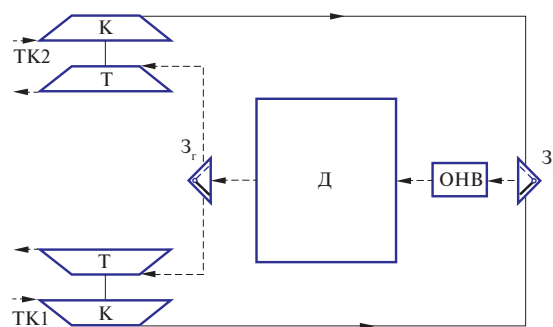


Рис. 2. Схема воздухообеспечения дизеля с регистровой системой наддува:
Д — дизель; TK1 и TK2 — турбокомпрессоры пусковой и маршевой; Т и К — турбинная и компрессорная ступени турбокомпрессора; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха; Z_b и Z_g — воздушная и газовая заслонки

Fig. 2. Diagram of the diesel engine air supply with a registered supercharging system:
Д — diesel engine; TK1 and TK2 — starting and cruise turbocharger; Т and К — turbocharger turbine and compressor stages; ОНВ — aftercooler; Z_b and Z_g — air and gas valves

Схема воздухообеспечения дизеля с регистровой системой наддува (опытная) приведена на рис. 2. Здесь первый турбокомпрессор ТК1 (пусковой) работает от режима холостого хода до примерно средней мощности дизеля, а второй отключен. На режимах от средней мощности до полной включается второй турбокомпрессор ТК2 (маршевой), а турбокомпрессор ТК1 отключается. Включение и отключение каждого турбокомпрессора осуществляется двумя заслонками Z_b и Z_g , каждая из которых одновременно соединяет компрессорную и турбинную ступени этого агрегата с охладителем наддувочного воздуха и выпускным коллектором поршневой части двигателя.

В качестве штатной схемы воздухообеспечения дизеля также рассмотрена схема на рис. 2, где заслонки Z_b и Z_g находятся в положении работы турбокомпрессора ТК2 на всех режимах его нагружения от холостого хода до полной мощности.

Графический расчет совместной работы компрессорных ступеней турбокомпрессоров с дизелем при регистровой системе наддува приведен на рис. 3. Для расчета выбраны два 12-цилиндровых дизель-генератора 5-26ДГ и 21-26ДГ тепловозов 2М62УК и 2ТЭ25К, полная мощность дизеля которых — 1470 и 2500 кВт при частоте вращения вала 750 и 1000 мин⁻¹ соответственно. В качестве пускового и маршевого турбокомпрессоров рассмотрены агрегаты наддува дизель-генераторов 5-26ДГ и 21-26ДГ соответственно. Для расчета использованы данные испытаний дизель-генераторов на АО «Коломенский завод».

Основные уравнения расчетной модели сведены в систему (1).

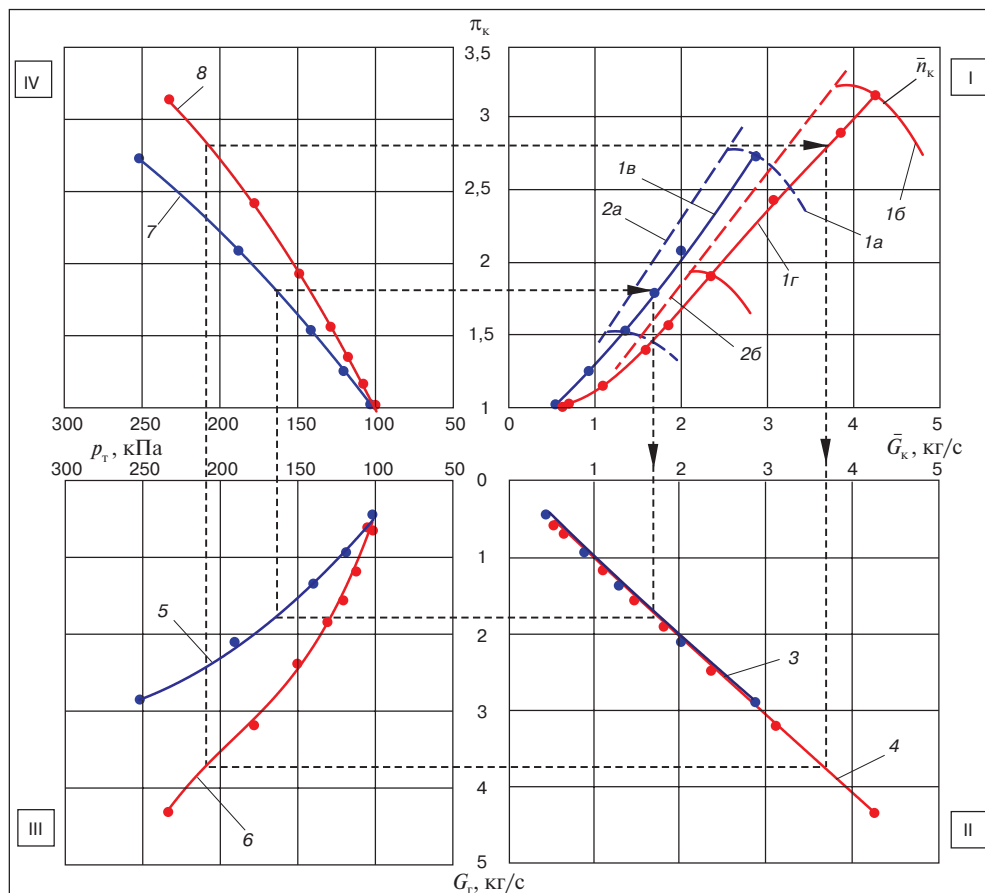


Рис. 3. Характеристики работы турбокомпрессоров с дизелем при регистрирующей системе наддува:

1а, 1б — характеристики компрессорных ступеней пускового и маршевого турбокомпрессоров соответственно; 1в, 1г — характеристики совместной работы компрессорных ступеней пускового и маршевого турбокомпрессоров с поршневой частью дизеля; 2а, 2б — границы помпажа компрессорных ступеней пускового и маршевого турбокомпрессоров; 3, 4 — расход газа через поршневую часть двигателя при работе пускового и маршевого турбокомпрессоров; 5, 6 — гидравлические характеристики газовойпускной части дизеля при работе пускового и маршевого турбокомпрессоров; 7, 8 — гидравлические характеристики компрессорной части пускового и маршевого турбокомпрессоров

Fig. 3. Characteristics of the operation of turbochargers with a diesel engine with a registered supercharging system:

1а, 1б — characteristics of the compressor stages of the start and cruise turbocharger respectively; 1в, 1г — characteristics of the combined operation of the compressor stages of the start and cruise turbochargers with the piston part of the diesel engine; 2а, 2б — surge limits of the compressor stages of the start and cruise turbochargers; 3, 4 — gas flow through the piston part of the diesel engine during the operation of the start and cruise turbochargers; 5, 6 — hydraulic characteristics of the gas outlet part of the diesel engine during the operation of the start and cruise turbochargers; 7, 8 — hydraulic characteristics of the compressor part of the start and cruise turbochargers

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_k = f(\bar{G}_k, \bar{n}_k) \\ \bar{G}_k = a \frac{G_k \sqrt{T_0}}{p_0} \\ \bar{n}_k = a \frac{n_k \sqrt{T_0}}{p_0} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{компрессорная ступень} \\ \text{турбокомпрессора;} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_r = G_k + G_f \\ p_r = f(G_r) \\ \pi_k = f(p_r) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{связь дизеля} \\ \text{с турбокомпрессором по газу;} \\ \text{гидравлические характеристики} \\ \text{дизеля и компрессорной ступени} \\ \text{турбокомпрессора,} \end{array}$$

где π_k — степень повышения давления воздуха в компрессорной ступени; $\bar{G}_k, \bar{n}_k$ — приведенные расход воздуха через компрессорную ступень и частота вращения ротора соответственно, кг/с, мин⁻¹; T_0, p_0 — температура и давление воздуха на входе в компрессор соответственно, К, Па; G_k, n_k — расход воздуха через компрессорную ступень и частота вращения ротора турбокомпрессора соответственно, кг/с, мин⁻¹; a — коэффициент приведения размерности температуры и давления воздуха к нормальным атмосферным условиям в К и Па; G_r — расход газа через поршневую часть дизеля, кг/с; G_f — расход топлива, кг/с; p_r — давление газа перед турбиной, кПа.

Расчет был выполнен для всех режимов дизеля при работе пускового и маршевого турбокомпрессоров по

уравнениям (1). Результаты расчета представлены на рис. 3 в четырех квадрантах.

В I квадранте даны графические характеристики компрессорных ступеней пускового и маршевого турбокомпрессоров (1а, 1б соответственно), здесь же линиями 2а и 2б показаны границы помпажа компрессорных ступеней каждого турбокомпрессора.

Во II квадранте рассчитывается расход газа через поршневую часть двигателя G_r для всех режимов дизеля при работе пускового и маршевого турбокомпрессоров (линия 3 и 4 соответственно).

В III квадранте приведены гидравлические характеристики газовыпускной части дизеля, показанные линиями 5 и 6 для каждого агрегата наддува. Характеристики определены экспериментальным путем. Различие их протекания связано с изменением сопротивления турбинных ступеней пускового и маршевого турбокомпрессоров.

В IV квадранте выполнено согласование характеристик степени повышения давления воздуха в компрессорной ступени турбокомпрессора π_k с давлением газа перед турбинной ступенью агрегата p_r для пускового и маршевого турбокомпрессоров, показанное линиями 7 и 8 соответственно.

Анализ совместной работы пускового и маршевого турбокомпрессоров с поршневой частью двигателя выполнен следующим образом. От характеристик пускового и маршевого агрегатов (линии 1в и 1г) в I квадранте показаны связи с их характеристиками в квадрантах II, III, IV (линии со стрелками). Можно увидеть, что пусковой турбокомпрессор (линия 1в) обеспечивает большую степень повышения давления наддувочного воздуха π_k , чем маршевый агрегат (линия 1г) на режимах ниже средней мощности дизеля. Полную мощность дизеля позволяет реализовать маршевый турбокомпрессор, эффективно работающий на режимах выше средней мощности.

Следует отметить, что линии совместной работы каждого агрегата наддува проходят в области высоких КПД их турбокомпрессоров. Эта особенность схемы воздухообеспечения с регистровой системой наддува позволяет расширить диапазон экономичной работы дизеля на режимах от холостого хода до полной мощности.

Предварительная оценка повышения топливной эффективности дизеля с регистровой системой наддува выполнена расчетно-экспериментальным методом имитации работы двигателя с опытной схемой воздухообеспечения на режимах нагружения по тепловозной характеристике. Для этого использованы данные испытаний дизель-генераторов 5-26ДГ и 21-26ДГ на АО «Коломенский завод».

Расчетная имитация схемы воздухообеспечения дизеля с регистровой системой наддува (опытная) выполнена следующим путем. На режимах нагружения

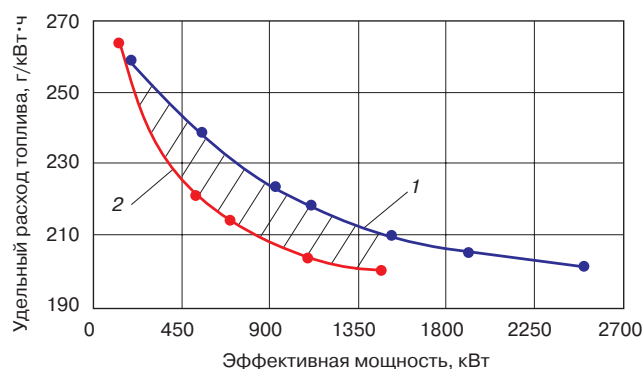


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива от мощности дизеля на режимах нагружения дизель-генераторов 21-26ДГ (1) и 5-26ДГ (2) по тепловозной характеристике. Выделена область экономии топлива при работе дизеля с регистровой системой наддува

Fig. 4. Dependence of the specific fuel flow on the diesel power in the loading modes of 21-26DG (1) and 5-26DG (2) diesel generators according to the diesel locomotive characteristic. The area of fuel economy is highlighted during diesel operation with the registered supercharging system is operating

дизеля от низких нагрузок до средней мощности, когда работает пусковой турбокомпрессор, использованы данные испытания дизель-генератора 5-26ДГ. При дальнейшем увеличении мощности до полной, когда работает маршевый турбокомпрессор, использованы данные испытания дизель-генератора 21-26ДГ.

В качестве штатной схемы воздухообеспечения дизеля, когда на всех режимах нагружения работает маршевый турбокомпрессор, использованы данные испытания дизель-генератора 21-26ДГ.

На рис. 4 приведены зависимости удельного расхода топлива указанных дизель-генераторов от мощности дизеля. Выделены режимы от низких нагрузок до примерно средней мощности дизеля, где удельный расход топлива дизель-генератора 5-26ДГ заметно ниже, чем дизель-генератора 21-26ДГ. Так, при мощности дизеля дизель-генератора 21-26ДГ, равной 50 и 25 % от полной мощности, удельный расход топлива двигателя с регистровой системой наддува снизился на 8,2 и 7,6 % соответственно.

Зависимость частоты вращения вала дизель-генераторов от мощности дизеля показаны на рис. 5. Видно, что на режимах от низких нагрузок до примерно средней мощности дизеля частота вращения вала дизель-генератора 5-26ДГ заметно ниже, чем дизель-генератора 21-26ДГ. На режимах выше средней мощности дизеля частота вращения повышается, достигая номинального значения при полной мощности.

Для обоснования причин столь существенно-го повышения экономичности дизеля с регистровой системой воздухообеспечения на рис. 6, 7 и 8 приведены основные параметры работы дизель-генераторов 21-9ДГ (1) и 5-26ДГ (2) на режимах нагружения по тепловозной характеристике. Видно, что на режимах

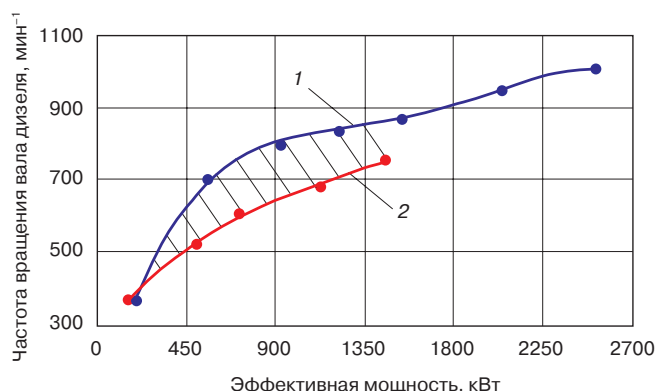


Рис. 5. Зависимость частоты вращения вала от мощности дизеля на режимах нагружения дизель-генераторов 21-26ДГ (1) и 5-26ДГ (2) по тепловозной характеристике. Выделена область работы дизеля с пониженной частотой вращения вала при регистровой системе наддува

Fig. 5. Dependence of the shaft speed on the diesel power in the loading modes of 21-26DG (1) and 5-26DG (2) diesel generators according to the diesel locomotive characteristic. The area of diesel operation with a reduced shaft speed with the registered supercharging system is highlighted

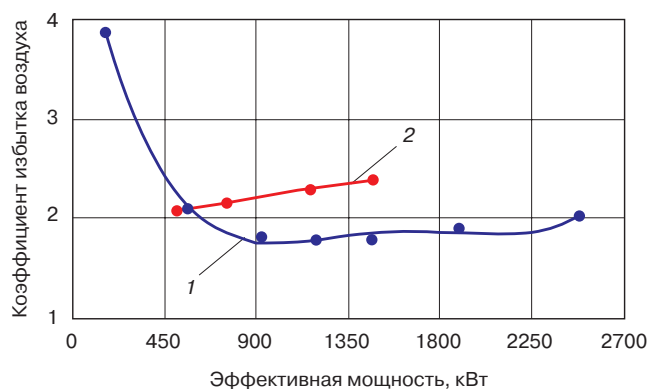


Рис. 7. Зависимость коэффициента избытка воздуха от мощности дизеля на режимах нагружения дизель-генераторов 21-26ДГ (1) и 5-26ДГ (2) по тепловозной характеристике

Fig. 7. Dependence of the coefficient of excess air on the diesel power in the loading modes of 21-26DG (1) and 5-26DG (2) diesel generators according to the diesel locomotive characteristic

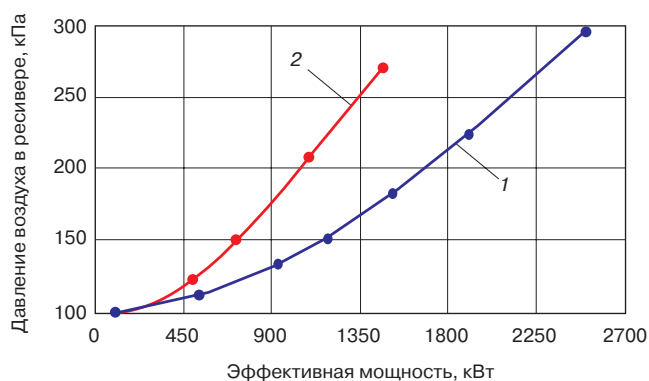


Рис. 6. Зависимость давления воздуха в ресивере от мощности дизеля на режимах нагружения дизель-генераторов 21-26ДГ (1) и 5-26ДГ (2) по тепловозной характеристике

Fig. 6. Dependence of the air pressure in the receiver on the diesel power in the loading modes of 21-26DG (1) and 5-26DG (2) diesel generators according to the diesel locomotive characteristic

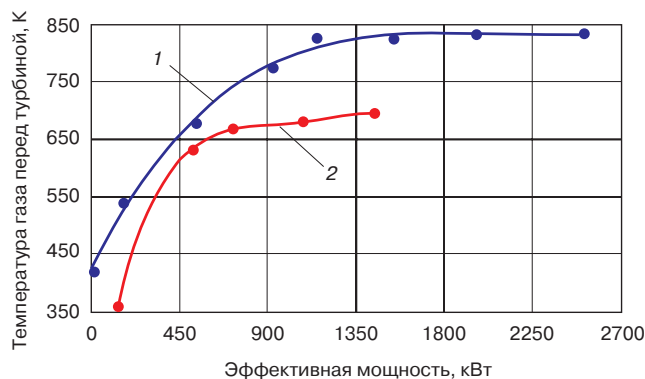


Рис. 8. Зависимость температуры газа перед турбиной от мощности дизеля на режимах нагружения дизель-генераторов 21-26ДГ (1) и 5-26ДГ (2) по тепловозной характеристике

Fig. 8. Dependence of the gas temperature before the turbine on the diesel power in the loading modes of 21-26DG (1) and 5-26DG (2) diesel generators according to the diesel locomotive characteristic

работы дизеля с пусковым турбокомпрессором давление наддувочного воздуха в ресивере (рис. 6) почти в два раза выше, чем при работе с маршевым турбокомпрессором. Подача в дизель большего количества воздуха позволяет повысить мощность и обеспечивает лучшее сгорание топлива в цилиндре (увеличен коэффициент избытка воздуха на режимах мощности более 560 кВт, а на режимах меньшей мощности коэффициент избытка воздуха сохраняет значения, близкие к оптимальным, рис. 7), что подтверждается очень существенным (от 80 до 120 °С) снижением температуры выпускных газов (рис. 8). Влияние указанных факторов наряду с пониженной частотой вращения вала является причиной повышенной топливной экономичности дизеля.

Для оценки эффективности применения регистровой системы наддува при работе на эксплуатационных режимах выбран дизель-генератор 21-26ДГ тепловоза 2ТЭ25К, топливно-мощностные характеристики которого приведены на рис. 4. Здесь же показаны характеристики дизель-генератора 5-26ДГ.

Расчет расхода топлива выполнен для трех режимов загрузки тепловоза (легкий, средний, тяжелый) по классификации ОСТ 32.198–2002 [10]. Дизели с опытной и штатной схемами воздухообеспечения работали одинаковое время с равной средней мощностью 1331, 1816 и 1965 кВт. Результаты расчета показали, что опытная система наддува по сравнению со штатной обеспечивает снижение расхода топлива на

3,7; 1,05 и 0,9 % соответственно для каждого из режимов загрузки.

Следует обратить внимание, что эффективность опытной системы наддува дизеля повышается при снижении средней загрузки двигателя в эксплуатации. Такие режимы загрузки чаще всего имеют место на маневровых тепловозах, где средняя мощность дизеля под нагрузкой составляет 10–20 % от полной. Можно ожидать, что модернизация серийного маневрового тепловоза ТЭМ18ДМ установкой дизеля с регистровой системой наддува позволит заметно снизить расход топлива в эксплуатации.

Отмеченный эффект от введения новой системы воздухообеспечения дизеля связан с техническими решениями, которые обеспечивают установку на дизеле двух агрегатов наддува с подводом к ним атмосферного воздуха и отводом от них выпускных газов, а также двух устройств (заслонок) подключения и отключения компрессорных и турбинных ступеней каждого агрегата к охладителю наддувочного воздуха и выхлопному коллектору. Также должна быть предусмотрена система автоматического управления работой этих устройств для последовательного подключения и отключения агрегатов на среднем мощностном режиме работы дизеля. Несмотря на сложность данных технических решений, имеется отечественный [8] и зарубежный [9] опыт их реализации. Применение на тепловозном дизеле схемы воздухообеспечения с регистровой системой наддува позволит наряду со снижением расхода топлива также повысить надежность и ресурс самого двигателя и его агрегатов наддува, поскольку оба агрегата наддува работают в своем диапазоне мощности дизеля, а значит, время работы каждого заметно меньше времени работы дизеля и ресурс работы агрегата увеличивается.

Заключение. Классификация систем воздухообеспечения тепловозных дизелей и анализ их преимуществ и недостатков позволили выявить направление их развития и резервы повышения топливной экономичности в эксплуатации.

Практика эксплуатации дизелей показала, что наиболее надежны и эффективны системы воздухообеспечения с минимальным количеством ступеней наддува (одноступенчатый наддув от турбокомпрессора) и простой связью агрегатов наддува с дизелем (последовательное соединение турбокомпрессора, охладителя наддувочного воздуха с поршневой частью двигателя). Серьезным недостатком одноступенчатых систем наддува является снижение их эффективности на режимах ниже средней мощности дизеля из-за падения энергии выпускных газов. Поскольку эти режимы занимают около половины времени работы дизелей магистральных тепловозов, то резервы

повышения экономичности двигателей в эксплуатации связаны с улучшением характеристик системы воздухообеспечения на режимах ниже средних мощностных.

Наиболее эффективным средством повышения экономичности и надежности дизелей с высоким газотурбинным наддувом на частичных режимах работы является применение регистровой системы наддува, содержащей два турбокомпрессора, каждый из которых обеспечивает наиболее экономичную работу дизеля на режимах ниже и выше 50 % полной мощности. Данная система позволяет увеличить подачу воздуха на этих режимах.

Предварительная оценка повышения топливной эффективности тепловоза 2ТЭ25К, оборудованного дизелем с регистровой системой наддува, по сравнению со штатным дизель-генератором 21-26ДГ показала, что при работе в эксплуатации на трех режимах загрузки со средней мощностью 1331, 1816 и 1965 кВт опытная система наддува обеспечивает снижение расхода топлива на 3,7; 1,05 и 0,9 % соответственно.

Практика создания, исследования и реализации регистровых систем наддува на АО «Коломенский завод» и за рубежом показала, что, несмотря на сложность конструкции, применение их целесообразно, поскольку они обеспечивают существенное увеличение эффективности силовой установки в эксплуатации. Рекомендуется проверить характеристики тепловозного дизеля с регистровой системой воздухообеспечения на стендовом дизель-генераторе с последующей эксплуатационной проверкой на тепловозе.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В.А. Гапанович [и др.]; под ред. В.А. Гапановича. М.: Интехэнерго-Издатель, 2014. 304 с. [Gapanovich V.A., Avilov V.D.,

Ivanov B.I., et al. *Energoberezhenie na zhelezнодорожном transporte: sprav.-metod. izd.* [Energy saving on railway transport: guidelines and reference]. Moscow: Intechenergo-Izdat; 2014. 304 p. (In Russ.).

2. Knelts V.F., Matisen A.B. Design Principles and Specifics of Air Supply Systems Used in the Engines Produced by JSC Kolomensky Zavod. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022, 16–20 May 2022, Sochi, Russia*. Cham: Springer; 2022. P. 248–258. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_25.

3. Агрегаты воздушоснабжения комбинированных двигателей внутреннего сгорания / Д.А. Дехович [и др.]; под ред. М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1973. 296 с. [Dekhovich D.A., Ivanov G.I., Kruglov M.G., et al. *Agregaty vozdukhosnabzheniya kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Air supply units of combined internal combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie; 1973. 296 p. (In Russ.).]

4. Поварков И.Л., Антюхин Г.Г. Совершенствование систем воздушоснабжения тепловозных дизелей. М.: Интекст, 1999. 190 с. [Povarkov I.L., Antyukhin G.G. *Sovershenstvovanie sistem vozdukhosnabzheniya teplovoznykh dizeley* [Improvement of the air supply system for diesel locomotives]. Moscow: Intext; 1999. 190 p. (In Russ.).]

5. Совершенствование агрегатов наддува тепловозных дизелей типа Д49 / Г.Г. Антюхин [и др.] // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института ж.-д. транспорта / под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричани. М.: РАС, 2019. Ч. 2. С. 214–227 [Antyukhin G.G., Povarkov I.L., Gnezdilov S.M., Kalugin M.E. *Sovershenstvovanie agregatov nadduva teplovoznykh dizeley tipa D49* [Improvement supercharging units of type D49 locomotive diesels]. In: Kosarev A.B., Gogrichiani G.V. (eds.). *Aktual'nye voprosy razvitiya zhelezнодорожного транспорта: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo in-ta zh.-d. transporta* [Major issues of rail transport development: Proceedings of the Russian National Research-to-Practice Conference for the 75th Anniversary of the postgraduate programme of the Railway Research Institute]. Moscow: RAS; 2019. Part 2. P. 214–227. (In Russ.).]

6. Шепелев А.В., Шепелев В.А. Эффективность применения охладителей наддувочного воздуха при модернизации дизелей типа Д49 // Двигателестроение. 1999. № 4. С. 35–37 [Shepelev A.V., Shepelev V.A. Efficiency analysis of a modernized intercooler for D49 engine. *Dvigatelistroyeniye*. 1999;4:35–37. (In Russ.).]

7. Шепелев В.А. Методы улучшения характеристик систем турбонаддува высокофорсированных дизелей магистральных тепловозов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2001. 277 с. [Shepelev V.A. *Metody uluchsheniya kharakteristik sistem turbonadduva vysokoforsirovannykh dizeley magistral'nykh teplovozov* [Methods of improving supercharging systems of high-power diesels of mainline diesel locomotives]. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.22.07. Moscow; 2001. 277 p. (In Russ.).]

8. Рыжов В.А. Совершенствование характеристик форсированных среднеоборотных двигателей двойного назначения средствами топливоподачи и воздушоснабжения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02. М., 2018. 328 с. [Ryzhov V.A. *Sovershenstvovanie kharakteristik forsirovannykh sredneoborotnykh dvigateley dvoynogo naznacheniya sredstvami toplivopodachi i vozdukhosnabzheniya* [Improving high-power medium-speed engines of dual purpose with fuel and air supply tools]. Dr. Sci. (Eng.) thesis: 05.04.02. Moscow; 2018. 328 p. (In Russ.).]

9. Ципленкин Г.Е., Иовлев В.И. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува // Двигателестроение. 2014. № 3. С. 16–22 [Tsypelenkin G.E., Iovlev V.I. Turbocharging System Optimization as a Means to Improve Engine Fuel Efficiency. *Dvigatelistroyeniye*. 2014;3:16–22. (In Russ.).]

10. ОСТ 32.198–2002. Тепловозы магистральные грузовые. Типовые режимы загрузки: дата введения 2003-04-01. М.: МПС России, 2002. 40 с. [OST 32.198–2002. *Teplovozy magistral'nye gruzovye. Tipovye rezhimy zagruzki* [Mainline freight diesel locomotive. Standard loading modes]. Introduction date 2003-04-01. Moscow: Russian Ministry of Railways; 2002. 40 p. (In Russ.).]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Леонидович ПОВАРКОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Тяга поездов», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10), Author ID: 1080220, <https://orcid.org/0000-0001-5072-4355>

Валерий Александрович РЫЖОВ,

д-р техн. наук, руководитель направления по развитию двигателестроения, Коломенский завод (140408, Московская область, г. Коломна, ул. Партизан, д. 42), Author ID: 1015645, <https://orcid.org/0000-0002-2492-1862>

Михаил Евгеньевич КАЛУГИН,

начальник отдела «Инжиниринговый центр двигателестроения ТМХ», Коломенский завод (140408, Московская область, г. Коломна, ул. Партизан, д. 42), <https://orcid.org/0000-0002-6893-8658>

Андрей Николаевич ЖУРАВЛЕВ,

научный сотрудник, научный центр «Тяга поездов», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626 г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1030511, <https://orcid.org/0000-0001-9354-2455>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor L. POVARKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Train Traction Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080220, <https://orcid.org/0000-0001-5072-4355>

Valeriy A. RYZHOV,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Engine Building Development, Kolomensky Zavod (140408, Moscow region, Kolomna, 42, Partizan St.), Author ID: 1015645, <https://orcid.org/0000-0002-2492-1862>

Mikhail E. KALUGIN,

Head of Department TMH Engine Engineering Center, Kolomensky Zavod (140408, Moscow region, Kolomna, 42, Partizan St.), <https://orcid.org/0000-0002-6893-8658>

Andrey N. ZHURAVLEV,

Researcher, Train Traction Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1030511, <https://orcid.org/0000-0001-9354-2455>

ВКЛАД АВТОРОВ

Игорь Леонидович ПОВАРКОВ. Разработка концепции статьи, обоснование цели, постановка задач и порядка подачи материала, разработка методов расчета, формирование заключительной части и выводов (25%).

Валерий Александрович РЫЖОВ. Анализ исследований, выполненных заводом, и представление их результатов, формирование заключительной части и выводов (25%).

Михаил Евгеньевич КАЛУГИН. Сбор и обработка экспериментальных данных по характеристикам дизелей разных моделей, формирование заключительной части и выводов (25%).

Андрей Николаевич ЖУРАВЛЕВ. Сбор и обработка данных по схемам и структуре систем наддува, типам агрегатов наддува дизелей, графическая часть методики расчета работы агрегатов наддува (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Igor L. POVARKOV. Development of the concept of the article, substantiation of the goal, setting tasks and order of submission of material, development of calculation methods, formation of the final part and conclusions (25%).

Valeriy A. RYZHOV. Analysis of the research done by the plant and presentation of their results, formation of the final part and conclusions (25%).

Mikhail E. KALUGIN. Collecting and processing experimental data on the characteristics of diesel engines of various models, the formation of the final part and conclusions (25%).

Andrey N. ZHURAVLEV. Collection and processing of data on the schemes and structure of supercharging systems, types of diesel supercharging units, the graphical part of the method for calculating the operation of supercharging units (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022, рецензия от первого рецензента получена 23.09.2022, рецензия от второго рецензента получена 26.09.2022, принята к публикации 19.12.2022.

The article was submitted 13.09.2022, first review received 23.09.2022, second review received 26.09.2022, accepted for publication 19.12.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучения принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель Генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д.10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (499) 260-41-08

