

# Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-63-76

## Совершенствование процесса топливоподачи в тепловозном дизеле

**В.А. Марков<sup>1</sup>, В.В. Фурман<sup>2</sup>, С.В. Плахов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> ООО «ППП «Дизельавтоматика»

## Improving the Fuel Supply Process in Locomotive Diesel Engines

**V.A. Markov<sup>1</sup>, V.V. Furman<sup>2</sup>, S.V. Plakhov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> ООО PPP Dizelavtomatika

Рассмотрена актуальная проблема совершенствования процесса топливоподачи тепловозного дизеля. Представлена разработанная в ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 для тепловозного дизеля Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства АО «Пензадизельмаш». Показана возможность существенного улучшения показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов такого двигателя путем оптимизации фазы начала топливоподачи — угла опережения впрыскивания топлива. Для оценки влияния этого угла на показатели тепловозного дизеля проведены экспериментальные исследования. Объектом стендовых испытаний являлась дизель-генераторная установка 1-ПДГ4Д, включающая в себя указанный двигатель и тяговый генератор МПТ-84/39. При испытаниях получены зависимости показателей дизеля от угла опережения впрыскивания топлива. Подтверждена необходимость оптимизации значений угла опережения впрыскивания топлива в соответствии с режимом работы дизеля. Выявлены оптимизированные значения угла опережения впрыскивания топлива в режимах тепловозной характеристики. Определены показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов дизеля при формировании оптимизированной характеристики угла опережения впрыскивания топлива.

**Ключевые слова:** маневровый тепловоз, дизельный двигатель, система автоматического регулирования, угол опережения впрыскивания топлива

A topical problem of improving the fuel supply process in locomotive diesel engines is considered in this article. An ESUVT.01 type electronic control system developed by ООО PPP Dizelavtomatika (Saratov) for a D50 (6 ChN 31.8/33) locomotive diesel engine manufactured by Penzadizelmash is presented. It is shown that fuel efficiency and exhaust gas toxicity indicators can be significantly improved by optimizing the initial fuel supply phase, that is the injection advance angle. Experimental studies are conducted to assess the influence of this angle on the locomotive engine characteristics. Bench tests were carried out on a 1-PDG4D diesel generator consisting of the above-mentioned diesel engine

and a traction generator MPT-84/39. As the result of the tests, dependencies of the diesel characteristics on the injection advance angle are obtained, and the need to optimize the injection advance angle according to the diesel operation mode is confirmed. Optimized values of the injection advance angle in the diesel characteristics modes are obtained. Fuel efficiency and exhaust gas toxicity indicators are determined at the optimized injection advance angle.

**Keywords:** diesel locomotive, diesel engine, rotational speed automatic control system, injection advance angle

На современном этапе развития двигателестроения основными потребительскими качествами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в частности тепловозных дизелей (ТД), остаются их топливная экономичность и токсичность отработавших газов (ОГ) [1, 2]. Ужесточение требований нормативных документов, ограничивающих вредное воздействие ДВС на окружающую среду, заставляет производителей искать способы снижения токсичности ОГ.

Самым простым и эффективным средством воздействия на рабочий процесс дизельного двигателя (далее дизель) с целью улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ является совершенствование процесса топливоподачи [3–5]. Это объясняется тем, что процессы топливоподачи, распыливания и смесеобразования определяют характер протекания процесса сгорания и, как следствие, упомянутые показатели дизеля.

Для решения задачи снижения токсичности ОГ дизелей целесообразно обеспечить опти-

мальное значение коэффициента избытка воздуха в каждом эксплуатационном режиме. Непременным условием достижения требуемых топливно-экономических и экологических показателей дизелей является повышение давления впрыскивания топлива, позволяющее улучшить качество распыливания топлива.

Необходимо реализовать управление фазой топливоподачи (в частности, углом опережения впрыскивания топлива — УОВТ), а также законом подачи топлива (включая реализацию многоразового впрыскивания). Каждое из этих мероприятий имеет свои преимущества и недостатки (рис. 1) [6], но можно найти компромиссные решения при их совместной реализации и использовании других технических решений (организации рециркуляции ОГ, управлении параметрами системы воздухообеспечения и др.).

В работах [4–6] показано, что для достижения требуемых топливно-экономических и экологических показателей дизеля необходимо

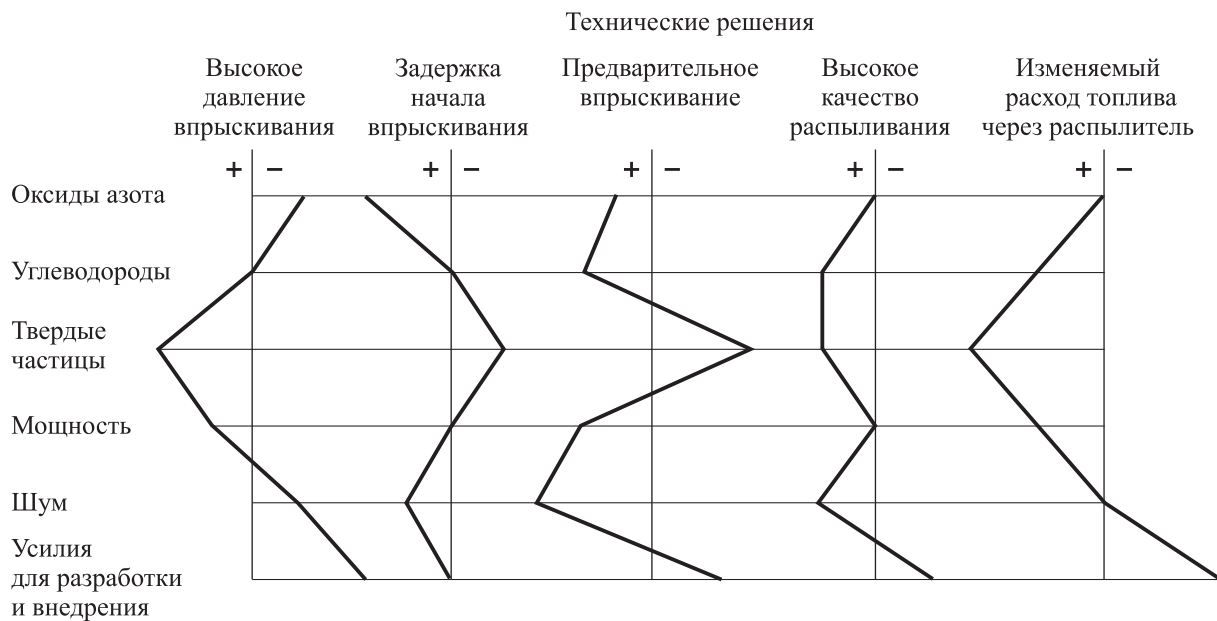


Рис. 1. Положительное (+) и отрицательное (-) влияние различных технических решений на показатели токсичности ОГ, мощность, уровень шума дизеля и усилия для его разработки и внедрения

обеспечить высокие гибкость и качество управления параметрами топливоподачи во всем диапазоне его рабочих режимов. Среди этих параметров важное место занимают момент начала подачи топлива или УОВТ.

Наилучшие показатели дизеля в каждом режиме можно обеспечить реализацией оптимизированных характеристик УОВТ. В связи с этим возникает необходимость выполнения дополнительных исследований с целью определения оптимизированных значений УОВТ в ТД, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов.

Проведены многочисленные исследования по оптимизации значений УОВТ для дизелей различного назначения, в том числе тепловозных [4, 7–10]. Влияние УОВТ на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ подтверждено обобщенными характеристиками, приведенными на рис. 2 [4], где ПКВ — поворот коленчатого вала; ВМТ — верхняя мертвая точка;  $\theta_{\text{опт}}$  — оптимальное значение УОВТ.

Характер изменения обобщенных характеристик объясняется тем, что уменьшение УОВТ приводит к смещению процесса сгорания на такт расширения с пониженными температурами сгорания и, следовательно, с небольшим выходом оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Но при этом сокращается период времени сгорания и увеличивается эмиссия продуктов неполного сгорания. Таким

образом, с уменьшением УОВТ выброс оксидов азота  $\text{NO}_x$  снижается, а удельный эффективный расход топлива и эмиссия сажи возрастают.

Следует отметить, что кроме оптимизации значений УОВТ в дизелях существует проблема реализации характеристик УОВТ, наибольшие возможности по формированию которых имеют системы электронного управления топливоподачей, построенные на современной микропроцессорной базе [4, 11–13].

Цель работы — оптимизация значений УОВТ, получение оптимизированной характеристики УОВТ и оценка эффективности ее реализации в ТД.

#### Система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля.

Система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 ТД разработана проектно-производственным предприятием ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). Эта система обладает широкими функциональными возможностями при формировании характеристик топливоподачи, включая УОВТ.

Управление процессом топливоподачи осуществляется с помощью быстродействующего электрогидравлического клапана, установленного в гидролинии высокого давления топливной системы. Для тепловозного дизеля Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства АО «Пензадизельмаш», применяемого на тепловозах ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ, разработан и изготовлен комплект электроуправляемых топливных насосов высокого давления (ТНВД) 4ЭТН.03 с электрогидравлическими клапанами (рис. 3).

ТНВД включает в себя насосную секцию с плунжером, приводимым от кулачка кулачкового вала (на рис. 3 эти элементы не показаны). При движении плунжера топливо вытесняется в надплунжерную полость 8, в которой установлен электронно-управляемый клапан 2. При его нахождении в крайнем левом положении надплунжерная полость сообщена с гидролинией низкого давления 1 ТНВД.

Электронно-управляемый клапан соединен с якорем 6 электромагнита 7. В требуемый момент времени на электромагнит подается управляющий сигнал от электронного блока управления системы ЭСУВТ.01, и якорь притягивается к электромагниту. При этом клапан 2 смещается вправо и своей кромкой 3 разобщает надплунжерную полость с гидролинией низкого давления ТНВД.

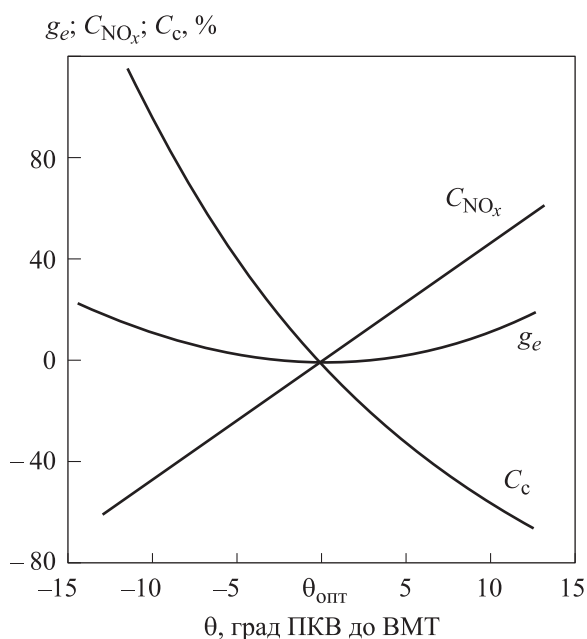


Рис. 2. Обобщенная зависимость изменения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  и содержания оксидов азота  $C_{\text{NO}_x}$  и сажи  $C_c$  в ОГ транспортных дизелей от УОВТ  $\theta$

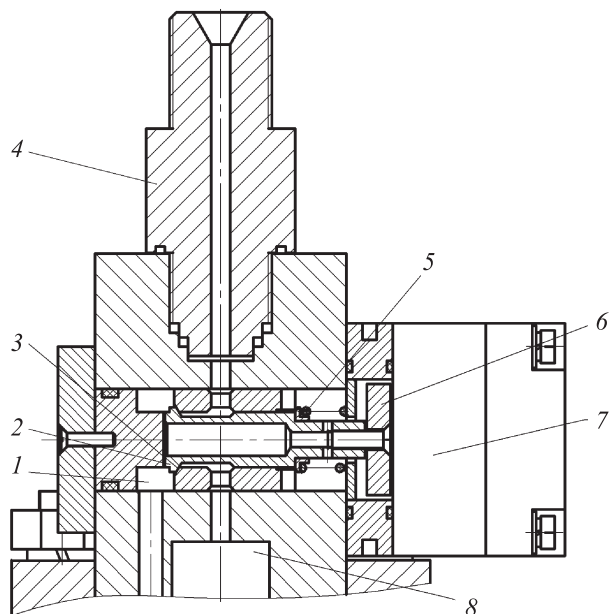


Рис. 3. Конструктивная схема ТНВД с электромагнитным клапаном управления подачи топлива:

- 1 — гидролиния низкого давления ТНВД;  
 2 и 3 — электроуправляемый клапан и его кромка;  
 4 — штуцер ТНВД; 5 — возвратная пружина; 6 — якорь;  
 7 — электромагнит; 8 — надплунжерная полость

Далее топливо под высоким давлением вытесняется в штуцер 4 ТНВД, откуда по нагнетательному топливопроводу подается к форсунке, которая впрыскивает топливо в цилиндр ТД.

Использование электроуправляемого клапана для управления фазами начала и окончания топливоподачи позволяет гибко регули-

ровать ее. В частности, появляется возможность реализации сложных законов управления УОВТ в соответствии с изменениями скоростного и нагрузочного режимов работы ТД.

Таким образом, основными элементами системы ЭСУВТ.01 являются: ТНВД с плунжерными парами, работающими постоянно в режиме максимальной подачи; электромагнитные клапаны, установленные на ТНВД; форсунки дизеля в штатной комплектации; блок управления; блок питания; выходные усилители; набор датчиков частоты вращения коленчатого вала (далее ЧВ) ТД и фазовой метки коленчатого вала, температуры воды, масла и давления масла; программатор.

Основные конструктивные особенности двух систем топливоподачи — серийной и опытной (ЭСУВТ.01) приведены в табл. 1.

Система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01, реализованная в тепловозах ТЭМ2, ТЭМ18ДМ и ЧМЭЗ, выполняет следующие функции: автоматическое поддержание заданной ЧВ ТД; автоматическое управление УОВТ в функции текущей ЧВ ТД; автоматическое регулирование мощности электрической передачи тепловоза; автоматическое ограничение тока и напряжения тягового генератора; управление ослаблением поля тяговых двигателей; регулирование бортового напряжения; ограничение тока заряда аккумуляторной батареи; программный пуск ТД; реализация режима пониженной ЧВ ТД в режиме холостого хода

Таблица 1

Основные конструктивные особенности систем топливоподачи

Особенность	Система топливоподачи	
	опытная	серийная
Тип ТНВД	Индивидуальный, прямого действия, плунжерный	Индивидуальный, прямого действия, плунжерный
Привод ТНВД	С жестким (кулачковым) приводом плунжера	С жестким (кулачковым) приводом плунжера
Плунжер ТНВД	Гладкий, цилиндрический по всей длине	Гладкий, цилиндрический, со спиральной кромкой
Форсунка	Закрытого типа с гидравлическим управлением иглой	Закрытого типа с гидравлическим управлением иглой
Регулирование подачи топлива	Продолжительностью закрытого состояния клапана (подачей управляющего сигнала на электромагнитный клапан ТНВД)	Перемещением рейки ТНВД, которая поворачивает плунжер с косою кромкой относительно отсечного отверстия по концу подачи
Управление УОВТ	Моментом начала закрытия клапана (подачей управляющего сигнала на электромагнитный клапан ТНВД)	Поворотом спиральной кромки плунжера относительно отсечного отверстия гильзы

с отключением части цилиндров в соответствии с порядком работы ТД; автоматический переход с пониженной ЧВ ТД на ЧВ, соответствующую нулевой позиции контроллера машиниста, при включении тормозного компрессора для быстрого наполнения тормозной магистрали воздухом; ограничение подачи топлива по заданному закону в зависимости от ЧВ ТД; отключение подачи топлива при достижении максимальной ЧВ ТД; отключение подачи топлива при уменьшении давления моторного масла ниже заданного значения; аварийный пуск ТД без ограничения подачи топлива; индикация основных параметров работы ТД и системы по дисплею на корпусе блока управления; автоматическое снижение мощности дизель-генераторной установки (ДГУ) при буксовании колесных пар тепловоза; самодиагностика элементов системы с возможностью непосредственного визуального контроля ее сообщений машинистом по дисплею на корпусе блока управления.

Проведенный анализ показал, что для обеспечения наилучших показателей ТД целесообразно изменять УОВТ в соответствии со скоростным и нагрузочным режимами. Такие законы управления УОВТ реализованы в некоторых системах топливоподачи серийных и опытных дизелей различного назначения [2, 4, 11, 14–19], в частности в ЭСУВТ.01.

Применение этой системы позволяет управлять фазами топливоподачи (УОВТ), что, безусловно, отражается на протекании дальнейшего рабочего процесса ТД, а также заметно улучшает показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. В связи с этим возникла необходимость экспериментальных исследований рабочего процесса тепловозного дизеля Д50, оснащенного такой системой топливоподачи с электронным управлением.

**Экспериментальные исследования показателей топливной экономичности ТД с системой электронного управления топливоподачей.** Исследована система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля Д50 с неразделенной камерой сгорания типа Гессельман, в котором реализовано объемное смесеобразование.

Проведены сравнительные испытания серийной системы топливоподачи с гидромеханическим регулятором и системы электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 для оценки работоспособности последней, а также

возможности получения с ее помощью требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ.

При экспериментальном исследовании системы электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 на моторном стенде (рис. 4) объектом исследования являлась ДГУ 1-ПДГ4Д производства ОАО «Пензадизельмаш», ТД которой имел номинальную мощность  $N_e = 830$  кВт при ЧВ  $n = 750$  мин<sup>-1</sup>.

Моторный стенд оборудован необходимой измерительной аппаратурой. В процессе экспериментов определяли основные показатели ТД: его эффективную мощность  $N_e$ , ЧВ  $n$ , приведенную к нормальным атмосферным условиям (с давлением 101,3 кПа и температурой 273 К) расход воздуха  $G_{air}$  (весовой) или  $V_{air}$  (объемный), расход топлива  $G_T$  и др.

Кроме штатных приборов для измерения основных параметров ТД моторный стенд оснастили дымомером ИДС-3С и газоанализатором VarioPlus. Испытания дизеля проводили при следующих условиях: атмосферное давление  $p_a = 99,9$  кПа, температура воздуха  $t_a = 22^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха  $\varphi_r = 33\%$ , парциальное давление водяных паров  $p_{\text{парц}} = 2,8$  кПа. Использовали дизельное топливо по ГОСТ 305–82 и моторное масло М14Г<sub>2</sub>ЦС.

Следует отметить, что серийная система топливоподачи с гидромеханическим регулятором не предусматривает управление УОВТ, поэтому при ее испытании установочный (статический) УОВТ не изменяли. В режиме, соответствующем восьмой позиции контроллера, динамический УОВТ, определяемый моментом начала подъема иглы форсунки,  $\theta = 16,8^\circ$  ПКВ до ВМТ.



Рис. 4. Общий вид моторного стенда с электроуправляемым ТНВД 4ЭТН.03 системы электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01

Таблица 2

Параметры дизеля Д50 в режимах ТХ

Параметр	Позиция контроллера							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ЧВ, мин <sup>-1</sup>	300	365	430	495	560	625	720	750
Эффективная мощность, кВт	100	200	300	400	520	625	780	830
Оптимальный УОВТ, град ПКВ до ВМТ	3,6	5,4	7,2	8,5	10,9	13,2	15,0	16,8
Удельный эффективный расход топлива при оптимальном УОВТ, г/(кВт·ч)	262,7	222,2	211,2	207,4	203,9	200,6	202,5	203,5
Удельный эффективный расход топлива при неизменном установочном УОВТ (для серийной системы топливоподачи)	267,0	225,8	214,0	209,7	205,5	201,6	202,8	203,5
Доля режима в общем времени работы дизеля, %	24,5	20,6	18,0	16,3	12,1	4,7	2,5	1,3
Весовой коэффициент $i$ -го режима $K_i$	0,245	0,206	0,180	0,163	0,121	0,047	0,025	0,013

При экспериментальном исследовании опытной системы топливоподачи УОВТ варируют с целью нахождения его оптимального значения в каждом из режимов тепловозной характеристики (ТХ).

В условиях эксплуатации дизели маневровых тепловозов работают в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов. Поэтому испытания проводили в режимах ТХ по рабочей методике РМ ПДЗ 02–2007 при различных позициях контроллера. Некоторые параметры дизеля Д50 в режимах ТХ приведены в табл. 2.

В режиме, соответствующем каждой позиции контроллера, часовой расход топлива

определяли весовым способом с учетом просочившегося в дренажную систему ТНВД (затем часовой расход топлива пересчитывали в удельный эффективный расход топлива  $g_e$ ). Во всех режимах каждого этапа испытаний проводили осциллографирование процессов сгорания и топливоподачи. Примеры осциллограмм процессов сгорания и топливоподачи дизеля Д50, оснащенного серийной и опытной системами топливоподачи, приведены на рис. 5. Там же показана синусоида с цикличностью 2 мс — опорный сигнал генератора с периодом 2 мс, который необходим для определения на записях самописца углов ПКВ по известной частоте

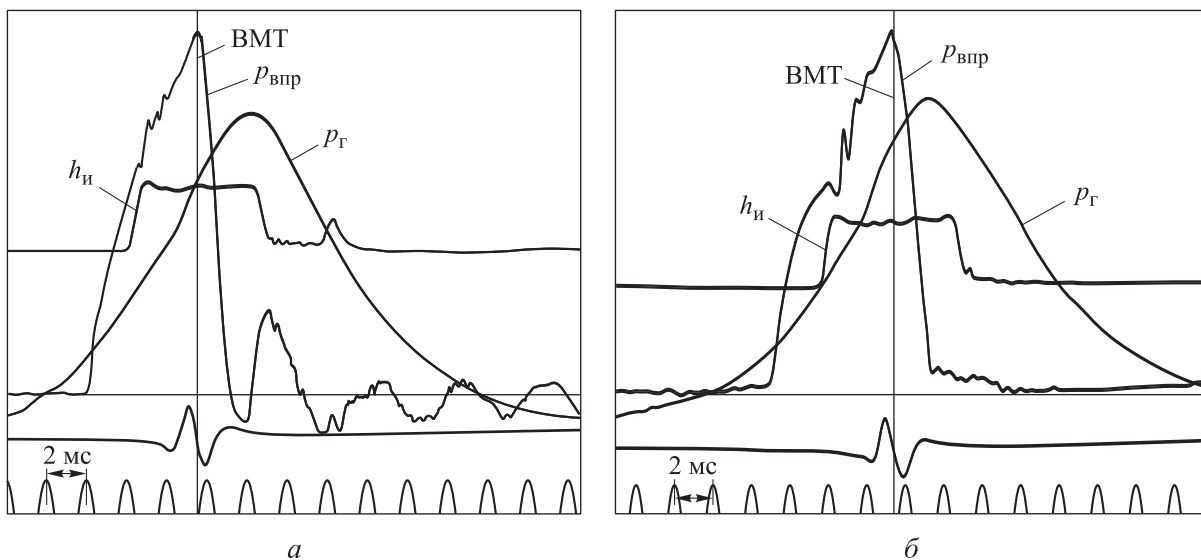


Рис. 5. Примеры осциллограмм процессов сгорания и топливоподачи дизеля Д50, оснащенного штатной (а) и опытной (б) системами топливоподачи, на восьмой позиции контроллера:  $p_{впр}$  — давление впрыскивания топлива на входе в форсунку;  $p_г$  — давление газов в цилиндре;  $h_и$  — перемещение иглы форсунки

вращения. Сигнал выше синусоиды — метка ВМТ на распределительном валу дизеля.

После экспериментальных исследований дизеля Д50, оснащенного штатной и опытной системами топливоподачи, по описанной методике проведена обработка осциллограмм процессов сгорания и топливоподачи. В результате этой обработки определены значения угла начала подъема давления в гидрوليнии высокого давления топливной системы, УОВТ (соответствующего углу начала подъема иглы форсунки) и продолжительности УОВТ для каждого режима.

Данные такой обработки осциллограмм и полученные значения УОВТ  $\theta$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  приведены в

табл. 2, а также на рис. 6, где штриховыми линиями обозначен целесообразный закон изменения УОВТ при переводе дизеля на позиции контроллера с пониженной ЧВ.

Эти данные подтверждают целесообразность оптимизации значений УОВТ и управления УОВТ в соответствии с режимом работы. Система ЭСУВТ.01 реализует такое управление УОВТ.

Результаты определения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  при различных значениях  $\theta$ , приведенные в табл. 2 и на рис. 6, свидетельствуют о том, что при переводе ТД на позиции контроллера с пониженной ЧВ целесообразно уменьшать УОВТ по характеристике, показанной на рис. 7.

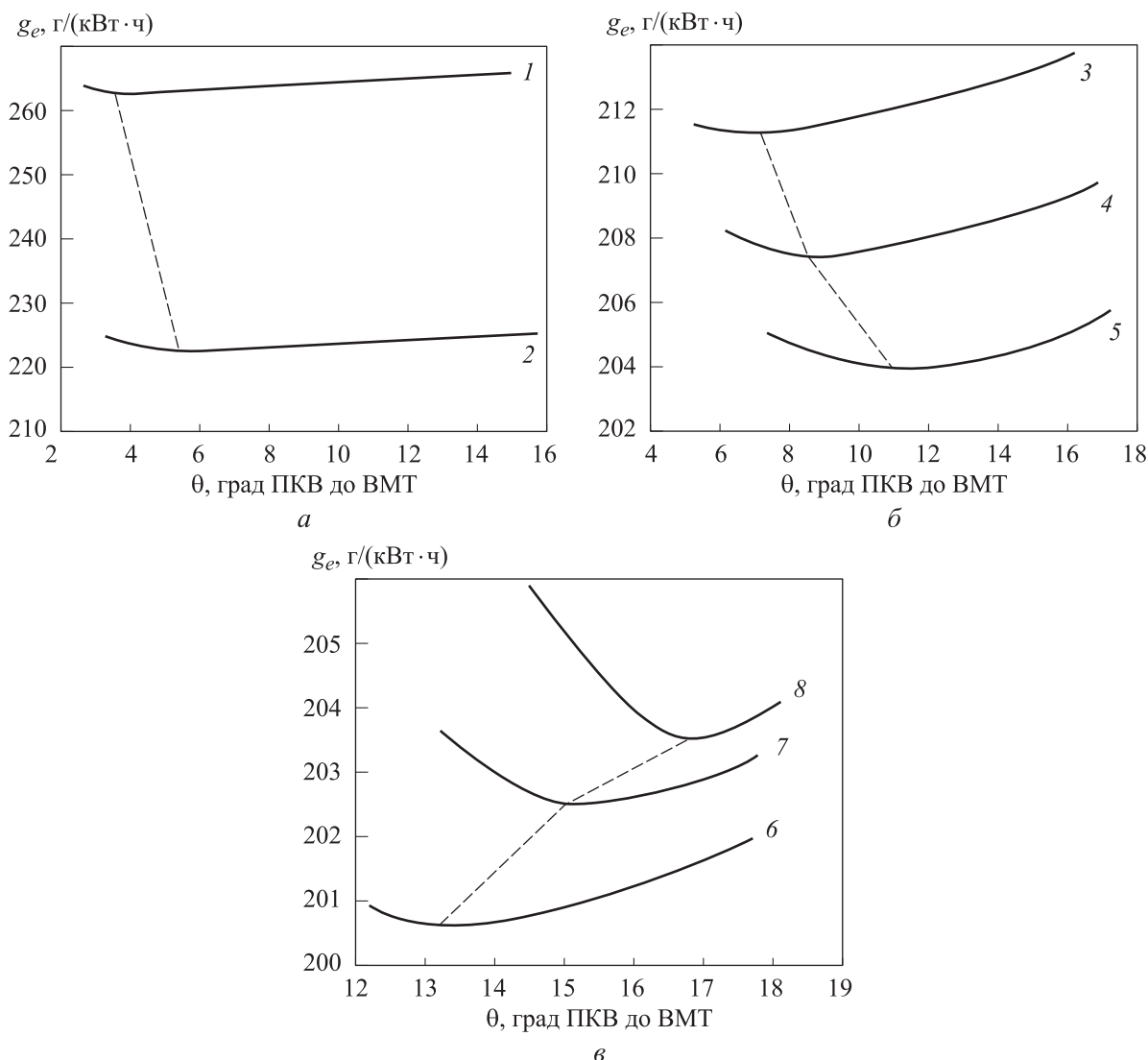


Рис. 6. Зависимости удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от УОВТ  $\theta$  в режимах ТХ, соответствующих разным позициям контроллера машиниста:  
 а — первой 1 и второй 2; б — третьей 3, четвертой 4 и пятой 5; в — шестой 6, седьмой 7 и восьмой 8

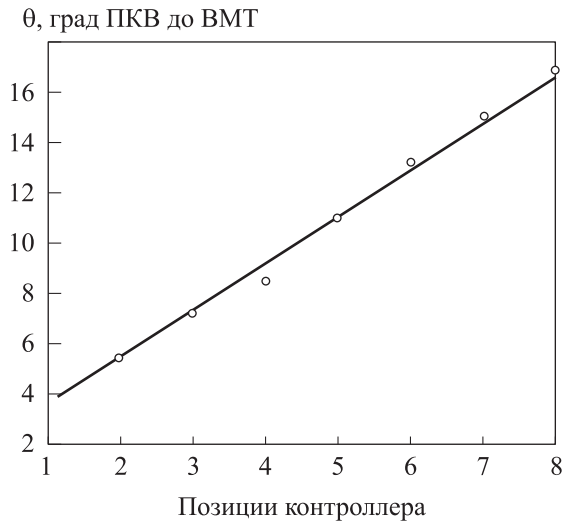


Рис. 7. Целесообразная (оптимизированная) по удельному эффективному расходу топлива  $g_e$ ) характеристика управления УОВТ в режимах ТХ:   
 ○ — минимумы расходов топлива (см. рис. 6);   
 — — оптимизированная характеристика управления УОВТ

Это обусловлено тем, что с уменьшением ЧВ дизеля увеличивается время, отводимое на процессы смесеобразования и сгорания, что приводит к целесообразности смещения начала впрыскивания ближе к ВМТ (т. е. к более позднему времени впрыскивания).

Наличие оптимума у характеристик  $g_e = f(\theta)$  с минимальными значениями удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  хорошо прослеживается на рис. 6. Применение системы ЭСУВТ.01 позволило снизить расход топлива в режимах, соответствующих первой–седьмой позициям контроллера. В частности, на первой позиции контроллера удельный эффективный расход топлива снизился на  $\Delta g_e = 4,3$  г/(кВт·ч), т. е. на 1,6 %.

Приведенная на рис. 7 оптимизированная по удельному эффективному расходу топлива  $g_e$  характеристика управления УОВТ в режимах ТХ предполагает уменьшение  $\theta$  с 16,8 до 3,6° ПКВ до ВМТ при переводе контроллера машиниста с восьмой позиции на первую.

**Оценка интегральных показателей топливной экономичности ТД с системой электронного управления топливоподачей в условиях реальной эксплуатации.** Известны различные подходы к оптимизации параметров ДВС, в том числе дизелей [6, 7, 20–24]. При такой оптимизации необходимо учитывать частные критерии по топливной экономичности, токсичности ОГ

и динамическим свойствам дизеля. Самым простым и распространенным из этих подходов является оптимизация параметров дизеля из условия обеспечения наименьшего эксплуатационного расхода топлива. Такой подход применен и в настоящей статье.

Эксплуатация ТД характеризуется частой сменой скоростных и нагрузочных режимов. Число переключений позиций контроллера машиниста (смен режимов) за один час работы ТД грузовых поездов в среднем составляет 50...90, пассажирских — 110...115, маневровых — до 130 [25]. Частая смена скоростных и нагрузочных режимов работы наиболее свойственна дизелям маневровых тепловозов.

Характерное для реальных условий эксплуатации распределение времени работы дизеля маневрового тепловоза по позициям контроллера машиниста тепловоза ЧМЭЗ за смену приведено на рис. 8 [26]. Оно свидетельствует о значительной доле режимов ТХ с пониженной ЧВ в общем распределении режимов работы дизеля (см. также режимы ТХ в табл. 3).

С помощью данных, приведенных на рис. 8, сначала для каждого из режимов рассчитывали

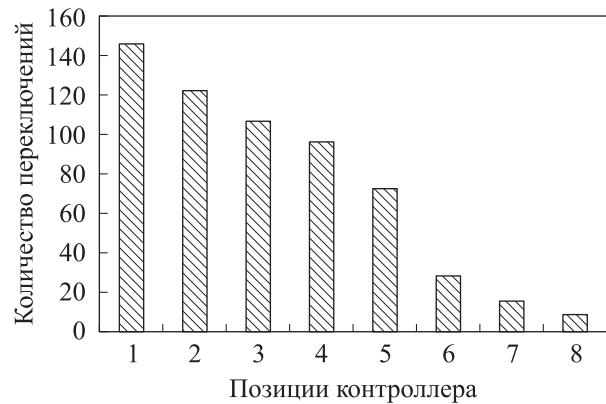


Рис. 8. Распределение количества переключений по позициям контроллера машиниста тепловоза ЧМЭЗ за смену

Таблица 3

**Режимы испытаний дизеля для определения дымности ОГ**

Номер режима	Мощность		ЧВ, мин <sup>-1</sup>
	кВт	%	
1	832,0	100	750
2	724,3	75	650
3	393,4	50	480
4	176,5	25	330
5	55,2	5	300



их доли ТХ в общем времени работы дизеля и весовые коэффициенты  $K_i$  (см. табл. 2). Затем определяли интегральные эксплуатационные расходы топлива  $g_{e \text{ инт}}$  в режимах ТХ при постоянном установочном УОВТ (для серийной системы топливоподачи) и при оптимальном УОВТ (для опытной системы топливоподачи) по выражению

$$g_{e \text{ инт}} = \sum_{i=1}^8 g_{ei} K_i.$$

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что при постоянном установочном УОВТ интегральный эксплуатационный расход топлива в режимах ТХ составил 226,70 г/(кВт·ч), а при регулировании УОВТ — 223,76 г/(кВт·ч). Таким образом, при замене серийной системы топливоподачи на опытную снижение интегрального эксплуатационного расхода топлива  $\Delta g_{e \text{ инт}}$  составило 2,94 г/(кВт·ч), т. е. 1,30 %.

Следует отметить, что при использовании опытной системы топливоподачи дополнительное уменьшение расхода топлива достигается благодаря оптимизации закона подачи топлива и более равномерному дозированию топлива по цилиндрам ТД.

Проведенные эксплуатационные испытания показали, что при оснащении тепловоза ЧМЭЗ опытной системой управления топливоподачей ЭСУВТ.01 суммарное снижение расхода топлива составило 8,24...11,49 % [27].

**Экспериментальные исследования показателей токсичности и дымности ОГ дизеля с си-**

**стемой электронного управления топливоподачей.** Экологичность дизеля Д50 ДГУ 1-ПДГ4Д, укомплектованного системой электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01, оценивали с помощью показателей дымности ОГ и их токсичности.

Испытания по определению дымности ОГ выполняли с целью оценки ее соответствия требованиям ГОСТ Р 51250–99 [28]. Замеры дымности ОГ проводили в процессе работы дизеля в режимах ТХ, приведенных в табл. 3, со значениями УОВТ, оптимизированными по показателям его топливной экономичности. Также измеряли приведенный коэффициент ослабления светового потока  $N$  и рассчитывали натуральный показатель ослабления светового потока  $K_n$ .

Результаты определения дымности ОГ дизеля Д50 с системой электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что этот параметр находится в пределах норм и соответствует требованиям ГОСТ Р 51250–99 [28].

При моторных испытаниях дизеля Д50 проведена проверка соответствия его вредных выбросов требованиям ГОСТ Р 51249–99 [29]. Замеры выбросов вредных веществ с ОГ выполняли в режимах ТХ дизеля Д50, приведенных в табл. 5.

Для выявления показателей токсичности ОГ измеряли объемные концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NO_x}$ , монооксида углерода  $C_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $C_{CH_x}$  (в миллионных объемных долях — ppm). Эти концентрации токсичных компонентов ОГ определяли в четырех режимах ТХ, приведенных в табл. 5.

Таблица 4

**Результаты определения дымности ОГ дизеля Д50 с системой электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01**

Номер режима	Расход топлива, кг/с	Расход воздуха, кг/с	Расход ОГ, дм <sup>3</sup> /с	Натуральный показатель ослабления светового потока $K_n$ , м <sup>-1</sup>	Приведенный коэффициент ослабления светового потока $N$ , %
1	0,050	1,70	1356,25	0,461/0,400	18/12
2	0,041	1,30	1039,27	0,519/0,400	20/11
3	0,022	0,82	621,55	0,638/0,370	24/10
4	0,010	0,48	379,75	0,829/0,300	30/9
5	0,004	0,41	336,89	0,897/0,300	32/9

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения, полученные при исследовании, в знаменателе — соответствующие ГОСТ Р 51250–99.

Таблица 5

**Режимы моторных испытаний дизеля Д50  
для определения показателей токсичности ОГ**

Номер режима	Мощность		ЧВ, мин <sup>-1</sup>
	кВт	%	
1	832,0	100	750
2	393,4	50	480
3	176,5	25	330
4	55,2	5	300

При оценке интегральной токсичности ОГ дизеля в этих режимах с использованием известных концентраций в ОГ токсичных компонентов  $C_{NO_x}$ ,  $C_{CO}$ ,  $C_{CH_x}$  рассчитывали их часовые массовые выбросы  $E_{NO_x}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CH_x}$ . Полученные значения вредных выбросов суммировали за весь цикл по каждому компоненту (с учетом весовых коэффициентов  $K_i$ , отражающих долю времени каждого режима) и затем делением на условную среднюю мощность ТД за испытательный цикл  $\sum(N_{ei}K_i)$  определяли удельные выбросы токсичных компонентов по формулам [6]

$$e_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_{NO_{xi}} K_i}{\sum_{i=1}^4 N_{ei} K_i};$$

Таблица 6

**Значения объемных концентраций токсичных компонентов в ОГ дизеля Д50 с системой электронного управления топливopодачей ЭСУВТ.01 и весовых коэффициентов каждого режима**

Номер режима	$N_e$ , кВт	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{air}$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_T$ , кг/ч	$C_{NO_x}$	$C_{CO}$	$C_{CH_x}$	$K_i$
					%			
1	832,0	750	5078,8	181,9	0,13	0,010	0,045	0,20
2	393,4	480	2330,3	81,4	0,10	0,006	0,035	0,10
3	176,5	330	1434,0	38,3	0,019	0,001	0,010	0,10
4	55,2	300	1284,6	15,0	0,0052	0,003	0,042	0,60

Таблица 7

**Значения удельных средневзвешенных выбросов токсичных компонентов ОГ дизеля Д50 с системой электронного управления топливopодачей ЭСУВТ.01**

Номер режима	$N_{ei}$ отн	$n_i$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{exhi}$ , м <sup>3</sup> /ч	$N_{ei}K_i$	$e_{NO_x}$	$e_{CO}$	$e_{CH_x}$
					г/(кВт·ч)		
1	1,00	750	4938,8	0,200	10,65/12,00	0,58/3,00	1,74/1,00
2	0,50	480	2267,7	0,050			
3	0,25	330	1404,5	0,025			
4	0,05	300	1273,0	0,030			

Примечание. В числителе дроби указаны значения, полученные при исследовании, в знаменателе — соответствующие ГОСТ Р 51249–99.

$$e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_{CO_i} K_i}{\sum_{i=1}^4 N_{ei} K_i};$$

$$e_{CH_x} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_{CH_{xi}} K_i}{\sum_{i=1}^4 N_{ei} K_i}.$$

Полученные значения удельных выбросов токсичных компонентов, отнесенные к единице вырабатываемой мощности,  $e_{NO_x}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH_x}$  сравнивали с предельно допустимыми нормами этих выбросов, установленными соответствующими нормативными документами на токсичность ОГ [29]. Результаты указанных измерений и расчетов показателей токсичности ОГ дизеля Д50 с системой электронного управления топливopодачей ЭСУВТ.01 приведены в табл. 6 и 7, где индексом «i» помечен i-й режим испытательного цикла;  $N_{ei}$  отн — относительная мощность (отношение мощности к ее максимальному значению);  $V_{exhi}$  — объемный расход ОГ.

Приведенные в табл. 7 данные свидетельствуют о том, что по выбросам оксидов азота  $e_{NO_x}$  и монооксида углерода  $e_{CO}$  дизель Д50, оснащенный системой электронного управления

топливоподачей ЭСУВТ.01, удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249–99. При этом удельные средневзвешенные выбросы несгоревших углеводородов  $e_{CH_x}$  превышают норму, установленную указанным стандартом. Эффективного снижения эмиссии несгоревших углеводородов  $CH_x$  можно достигнуть применением средств очистки ОГ (но исследуемый дизель не оборудован каталитическим нейтрализатором).

## Выводы

1. Разработанная система электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01 позволяет реализовать гибкое управление топливоподачей в соответствии с режимом работы ТД. Это позволяет улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля.

2. По результатам проведенной оптимизации значений УОВТ в режимах ТХ предложена оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления УОВТ.

3. Оптимизированная по удельному эффективному расходу топлива характеристика управления углом опережения впрыскивания топлива в режимах ТХ предполагает уменьше-

ние УОВТ с 16,8 до 3,6°ПКВ до ВМТ при переводе контроллера машиниста с восьмой позиции на первую.

4. При реализации оптимизированной характеристики УОВТ в дизеле Д50 (при замене серийной системы топливоподачи на опытную ЭСУВТ.01) снижение интегрального эксплуатационного расхода топлива составило 2,94 г/(кВт·ч), т. е. 1,30 %. При установке системы ЭСУВТ.01 на дизель Д50 дополнительное уменьшение расхода топлива достигается оптимизацией закона топливоподачи и более равномерным дозированием топлива по цилиндрам ТД.

5. Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что дымность ОГ дизеля Д50, оснащенного системой электронного управления топливоподачей ЭСУВТ.01, находилась в пределах норм, соответствующих требованиям ГОСТ Р 51250–99.

6. По выбросам оксидов азота и монооксида углерода дизель Д50 с системой ЭСУВТ.01 удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249–99. Повышенную эмиссию несгоревших углеводородов можно снизить путем оснащения ТД каталитическим нейтрализатором.

## Литература

- [1] Луканин В.Н., ред. *Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов*. Москва, Высшая школа, 2005. 479 с.
- [2] Коссов Е.Е., Шапран Е.Н., Фурман В.В. *Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов*. Луганск, ВНУ им. В. Даля, 2006. 280 с.
- [3] Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. *Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 360 с.
- [4] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Системы топливоподачи и управления дизелей*. Москва, Изд-во Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [5] Grekhov L.V., Dragan Yu.E., Denisov A.A., Starkov E.E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, no. 6(3), pp. 1890–1902.
- [6] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
- [7] Гусаков С.В., Патрахальцев Н.Н. Выбор программы регулирования угла опережения впрыска, оптимизированной по экономичности и токсичности отработавших газов. *Исследование двигателей и машин. Сб. науч. тр. УДН им. П. Лумумбы*, Москва, 1980, с. 18–21.
- [8] Khatri K.K., Sharma D., Soni S.L., Kumar S., Tanwar D. Investigation of Optimum Fuel Injection Timing of Direct Injection CI Engine Operated on Preheated Karanj-Diesel Blend. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2010, vol. 4, no. 5, pp. 629–640.
- [9] Parlak A., Yasar H., Hasimoglu C., Kolip A. The Effects of Injection Timing on  $NO_x$  Emissions of a Low Heat Rejection Indirect Diesel Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 3042–3052, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.03.012
- [10] Фурман В.В., Иванов В.А., Марков В.А. Системы электронного управления для дизельных двигателей. *Инженерный журнал. Наука и образование*, 2013, вып. 5, с. 1–18. URL: <http://engjournal.ru/issues/18.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-5-723

- [11] Bosch. Системы управления дизельными двигателями. Москва, Изд-во За рулем, 2004. 480 с.
- [12] Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. Москва, Изд-во «Легион-Автодата», 2001. 136 с.
- [13] Фурман В.В. Система топливоподачи с электронным управлением для дизеля. *Грузовик*, 2014, № 9, с. 10–14.
- [14] Hiemesch O., Lonkai G., Schenkermayr G. Das BMW-Abgasreinigungskonzept für Dieselmodelle. *MTZ*, 1990, jg. 51, no. 5, pp. 196–200.
- [15] Kawai M., Miyagi H., Nakano J. Toyota's New Microprocessor-Based Diesel Engine Control System for Passenger Cars. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 1985, vol. 32, no. 4, pp. 289–293, doi: 10.1109/TIE.1985.350099
- [16] Nishizawa K., Ishiwata H., Yamaguchi S. A New Concept of Diesel Fuel Injection — Timing and Injection Control System. *SAE Technical Paper Series*, 1987, no. 870434, pp. 1–9, doi: 10.4271/870434
- [17] Parker R.F. Future Fuel Injection Requirements for Mobile Equipment Diesel Engines. *Diesel and Gas Turbine Progress*, 1976, vol. 42, no. 10, pp. 18–19.
- [18] Shiozaki M., Hobo N., Akahori J. Development of a Fully Capable Electronic Control System for Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*, 1985, no. 850172, pp. 1–8, doi: 10.4271/850172
- [19] Trenne M.U., Ives A.P. Closed Loop Design for Electronic Diesel Injection Systems. *SAE Technical Paper Series*, 1982, no. 820447, pp. 133–139, doi: 10.4271/820447
- [20] Грехов Л.В., Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 64 с.
- [21] Коссов Е.Е., Сухопаров С.И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. Москва, Изд-во «Интекст», 1999. 184 с.
- [22] Файнлейб Б.Н., Гинзбург А.М., Волков В.И. Оптимизация угла опережения впрыска топлива. *Двигателестроение*, 1981, № 2, с. 16–19.
- [23] Крутов В.И., Шаров Г.И. Управление турбопоршневыми двигателями по парето-оптимальным функциям. *Двигателестроение*, 1989, № 9, с. 19–21.
- [24] Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. Харьков, Изд-во ХПИ, 2003. 244 с.
- [25] Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания. Москва, Изд-во РУДН, 2009. 380 с.
- [26] Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В., Са Б. Экспериментальные исследования системы автоматического регулирования частоты вращения вала тепловозного дизеля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 35–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-35-50
- [27] Фурман В.В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2017. 321 с.
- [28] ГОСТ Р 51250–99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. Москва, Изд-во Стандартов, 1999. 20 с.
- [29] ГОСТ Р 51249–99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. Москва, Изд-во Стандартов, 1999. 42 с.

## References

- [1] *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya rabochikh protsessov* [Internal combustion engines. Workflow theory]. Ed. Lukanin V.N. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2005. 479 p.
- [2] Kossov E.E., Shapran E.N., Furman V.V. *Sovershenstvovaniye rezhimov raboty silovykh energeticheskikh sistem teplovozzov* [Improving the operating modes of power energy systems of diesel locomotives]. Lugansk, VNU im. V. Dal'ya publ., 2006. 280 p.
- [3] Markov V.A., Devyanin S.N., Mal'chuk V.I. *Vpryskivaniye i raspylivaniye topliva v dizelyakh* [Diesel fuel injection and atomization]. Moscow, Bauman Press, 2007. 360 p.

- [4] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniya dizeley* [Diesel fuel supply and control systems]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.
- [5] Grekhov L.V., Dragan Yu.E., Denisov A.A., Starkov E.E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, no. 6(3), pp. 1890–1902.
- [6] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley* [Diesel exhaust toxicity]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.
- [7] Gusakov C.B., Patrakhal'tsev H.H. The choice of a program for adjusting the angle of advance of the injection, optimized for the economy and toxicity of exhaust gases. *Issledovaniye dvigateley i mashin: Sb. nauch. tr. UDN im. P. Lumumby* [Study of engines and machines. Collection of scientific works of UDN named after P. Lumumba]. Moscow, 1980, pp. 18–21.
- [8] Khatri K.K., Sharma D., Soni S.L., Kumar S., Tanwar D. Investigation of Optimum Fuel Injection Timing of Direct Injection CI Engine Operated on Preheated Karanj-Diesel Blend. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2010, vol. 4, no. 5, pp. 629–640.
- [9] Parlak A., Yasar H., Hasimoglu C., Kolip A. The Effects of Injection Timing on NO<sub>x</sub> Emissions of a Low Heat Rejection Indirect Diesel Injection Engine. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 3042–3052, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.03.012
- [10] Furman V.V., Ivanov V.A., Markov V.A. Electronic control systems for diesel engines. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 5, pp. 1–18 (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/issues/18.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-5-723
- [11] *Bosch. Sistemy upravleniya dizel'nyimi dvigatelyami* [Bosch Diesel engine control systems]. Moscow, Za rulem publ., 2004. 480 p.
- [12] Pinskiy F.I., Davtyan R.I., Chernyak B.Ya. *Mikroprotsessornyye sistemy upravleniya avtomobil'nyimi dvigatelyami vnutrennego sgoraniya* [Microprocessor control systems for automotive internal combustion engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2001. 136 p.
- [13] Furman V.V. Electronically controlled diesel fuel supply system. *Truck*, 2014, no. 9, pp. 10–14 (in Russ.).
- [14] Hiemesch O., Lonkai G., Schenkermayr G. The BMW emission control concept for diesel models. *MTZ*, 1990, vol. 51, no. 5, pp. 196–200.
- [15] Kawai M., Miyagi H., Nakano J. Toyota's New Microprocessor-Based Diesel Engine Control System for Passenger Cars. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 1985, vol. 32, no. 4, pp. 289–293, doi: 10.1109/TIE.1985.350099
- [16] Nishizawa K., Ishiwata H., Yamaguchi S. A New Concept of Diesel Fuel Injection — Timing and Injection Control System. *SAE Technical Paper Series*, 1987, no. 870434, pp. 1–9.
- [17] Parker R.F. Future Fuel Injection Requirements for Mobile Equipment Diesel Engines. *Diesel and Gas Turbine Progress*, 1976, vol. 42, no. 10, pp. 18–19.
- [18] Shiozaki M., Hobo N., Akahori J. Development of a Fully Capable Electronic Control System for Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*, 1985, no. 850172, pp. 1–8, doi: 10.4271/850172
- [19] Trenne M.U., Ives A.P. Closed Loop Design for Electronic Diesel Injection Systems. *SAE Technical Paper Series*, 1982, no. 820447, pp. 133–139, doi: 10.4271/820447
- [20] Grekhov L.V., Kuleshov A.S. *Matematicheskoye modelirovaniye i komp'yuternaya optimizatsiya toplivopodachi i rabochikh protsessov dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Mathematical modeling and computer optimization of fuel supply and working processes of internal combustion engines]. Moscow, Bauman Press, 2000. 64 p.
- [21] Kossov E.E., Sukhoparov S.I. *Optimizatsiya rezhimov raboty teplovoznykh dizel'-generatorov* [Optimization of operating modes of diesel diesel generators]. Moscow, Intekst publ., 1999. 184 p.
- [22] Faynleyb B.N., Ginzburg A.M., Volkov V.I. Fuel injection timing optimization. *Dvigatlestroyeniye*, 1981, no. 2, pp. 16–19 (in Russ.).
- [23] Krutov V.I., Sharov G.I. Piston-optimized turbo piston engine control. *Dvigatlestroyeniye*, 1989, no. 9, pp. 19–21 (in Russ.).
- [24] Parsadanov I.V. *Povysheniye kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteriya* [Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on an integrated fuel and environmental criterion]. Kharkov, KhPI publ., 2003. 244 p.

- [25] Patrakhal'tsev N.N. *Neustanovivshiyesya rezhimy raboty dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Unsteady operating modes of internal combustion engines]. Moscow, RUDN publ., 2009. 380 p.
- [26] Markov V.A., Furman V.V., Plakhov S.V., Sa B. Experimental Studies of the Rotational Speed Automatic Control System for Locomotive Engine Shafts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 35–50 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-35-50
- [27] Furman V.V. *Uluchsheniye ekspluatatsionno-tekhnicheskikh kharakteristik dizel'-generatorov teplovozov putem sozdaniya i sovershenstvovaniya sistem elektronnoy upravleniya*. Dokt. Diss. [Improving the operational and technical characteristics of diesel locomotive diesel generators by creating and improving electronic control systems. Doct. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2017. 321 p.
- [28] GOST R 51250–99. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevyye. Dymnost' otrabotavshikh gazov. Normy i metody opredeleniya* [State Standard R 51250—99. Internal combustion reciprocating engines. Visible pollutants. Limit values and test methods]. Moscow, Standartinform publ., 1999. 20 p.
- [29] GOST R 51249–99. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevyye. Vybrosov vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami. Normy i metody opredeleniya* [State Standard R 51249–99. Internal combustion reciprocating engines. Emissions of harmful substances with the exhaust gases. Limit values and test methods]. Moscow, Standartinform publ., 1999. 42 p.

Статья поступила в редакцию 20.11.2019

## Информация об авторах

**МАРКОВ Владимир Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

**ФУРМАН Виктор Владимирович** — доктор технических наук, генеральный директор. ООО «ППП «Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 109, e-mail: dizavt@overta.ru).

**ПЛАХОВ Сергей Валентинович** — зам. генерального директора, главный программист. ООО «ППП Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 109, e-mail: plahov@overta.ru).

## Information about the authors

**MARKOV Vladimir Anatolievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

**FURMAN Viktor Vladimirovich** — Doctor of Science (Eng.), General Director. ООО PPP Dizelavtomatika (410017, Saratov, Russian Federation, Chernyshevskiy St., Bldg. 109, e-mail: dizavt@overta.ru).

**PLAKHOV Sergei Valentinovich** — Deputy General Director, Chief Programmer. ООО PPP Dizelavtomatika (410017, Saratov, Russian Federation, Chernyshevskiy St., Bldg. 109, e-mail: plahov@overta.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В. Совершенствование процесса топливоподачи в тепловозном дизеле. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 63–76, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-63-76

### Please cite this article in English as:

Markov V.A., Furman V.V., Plakhov S.V. Improving the Fuel Supply Process in Locomotive Diesel Engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 4, pp. 63–76, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-63-76