

На правах рукописи



Курманова Лейла Салимовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ  
ТЕПЛОВОЗОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСИ ДИЗЕЛЬНОГО  
ТОПЛИВА И ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО СамГУПС)»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
НОСЫРЕВ Дмитрий Яковлевич – профессор кафедры «Локомотивы»  
«Самарский государственный университет путей сообщения  
(ФГБОУ ВО СамГУПС)»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
КОССОВ Евгений Евгеньевич – главный научный сотрудник «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»)»

доктор технических наук, профессор  
БИРЮК Владимир Васильевич – профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет (ТГУ)»

Защита диссертации состоится «15» мая 2019 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп.

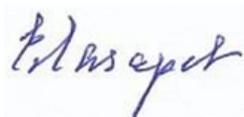
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и на его официальном сайте <http://susu.ac.ru/>.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета университета Д 212.298.09.

E-mail: D212.298.09@mail.ru

Автореферат разослан «    »                      2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор



Лазарев Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** диссертационной работы обусловлена необходимостью улучшения энергоэкономических и экологических показателей дизелей тепловозов и определена в «Энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года», в «Стратегии инновационного развития» и в «Программе инновационного развития» на период до 2020 года».

Эффективным методом улучшения показателей является использование компримированного природного газа (КПГ) в качестве добавки к дизельному топливу. Эксплуатация маневровых тепловозов характеризуется частым изменением режимов работы и применение сжиженного природного газа (СПГ) невозможно из-за инерционности газификатора, поэтому для них целесообразно применять КПГ.

Смещение КПГ с дизельным топливом позволяет улучшить качество распыла и сгорания смесового топлива путем дополнительного разрушения его топливной струи за счет выделения природного газа при перепаде давления, что способствует более тонкому и однородному распыливанию с множеством начальных очагов воспламенения. В результате сгорания природного газа в полном объеме происходит повышение давления и температуры, что сказывается на разрушении топливной струи.

Таким образом, вопросы по повышению эффективности работы тепловозных дизелей путем применения смесового топлива являются актуальными.

**Цель работы:** повышение эффективности работы дизелей тепловозов путем применения смеси дизельного топлива и природного газа.

**Задачи исследования:**

– проанализировать особенности применения природного газа в тепловозных дизелях и выполнить анализ существующих способов его смешения с дизельным топливом;

– выявить особенности и механизмы определения теплофизических свойств смесевого топлива для расчета показателей работы тепловозных дизелей в зависимости от месторождения природного газа;

– разработать методику расчета теплоты, выделившейся при сгорании смесевого топлива с учетом компонентного состава природного газа, позволяющую оценить показатели работы дизелей тепловозов;

– разработать систему подачи смесевого топлива с входящим в нее перемешивающим устройством и выполнить расчет его характеристик;

– провести расчетно-экспериментальные исследования влияния доли замещения дизельного топлива природным газом на энергоэкономические и экологические показатели работы дизеля 6ЧН31/36;

– оценить внутрицилиндровые параметры дизеля по индикаторной диаграмме и характеристикам тепловыделения.

**Объект исследования:** рабочий цикл дизеля K6S310DR (6ЧН31/36) тепловоза ЧМЭЗ, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа.

**Предмет исследования:** энергоэкономические и экологические показатели дизеля.

**Научная новизна:**

- усовершенствована математическая модель, учитывающая низшую теплоту сгорания смесевого топлива в зависимости от доли замещения дизельного топлива и низшей теплотворной способности природного газа различных месторождений для оценки показателей работы тепловозных дизелей;

- методика расчета теплоты, выделившейся при сгорании смесевого топлива с учетом компонентного состава природного газа, указанного в паспорте при заправке тепловоза, позволяющая периодически уточнять программу регулирования системы управления подачи топлива по режимам работы путем введения коэффициента компонентного состава.

- получены сравнительные результаты энергоэкономических и экологических показателей в зависимости от нагрузки с оптимальной долей замещения дизельного топлива природным газом для расчетного оптимального планирования эффективной работы дизелей тепловозов и выбора рациональных регулировочных решений рабочего цикла.

**Практическая значимость** результатов исследования заключается в:

- разработке методики расчета теплоты, выделившейся при сгорании смесового топлива, позволяющей оценить показатели работы тепловозных дизелей при коэффициенте компонентного состава природного газа  $K_0=0,92-1,08$ ;

- разработке системы подачи смесового топлива с перемешивающим устройством, обеспечивающим растворимость природного газа в дизельном топливе, которая оценивается величиной  $m_{\text{пг}} = 0,10-0,14\%$ , что позволяет повысить степень однородности смесового топлива;

- в применении перемешивающего устройства, позволяющего получить высокодисперсную однородную смесь дизельного топлива и природного газа за счет цилиндрической камеры закручивания и чередующихся тангенциально расположенных отверстий со штуцерами-жиклерами подачи дизельного топлива и природного газа, в которых установлены шнековые завихрители, что способствует повышению эффективности работы тепловозных дизелей на смесовом топливе в условиях реальной эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы применялись экспериментальные методы, методы математического моделирования, методы планирования и обработки результатов натурного и вычислительного эксперимента, методы регрессионного анализа. Сравнительный расчет показателей работы тепловоза выполнен в программе *ENGINE*. При обработке результатов экспериментального исследования применялись пакеты программ *Microsoft Excel*, *Statistica*.

Разработка топливоподающей системы дизеля и перемешивающего устройства для работы на смесевом топливе выполнена с помощью программного комплекса *КОМПАС-3D*. В программном комплексе *SolidWorks* с использованием модуля газодинамического анализа *Flow Simulations* проведен расчет скоростей дизельного топлива и природного газа внутри смесителя.

**Реализация работы.** Полученные результаты используются на Южно-Уральской железной дороге в сервисном локомотивном депо «Орск» в виде рекомендаций по использованию системы подачи, смешивания и дозирования природного газа в дизелях тепловозов, а также в научно-исследовательской лаборатории «ЛЭУ» кафедры «Локомотивы» СамГУПС в виде действующей лабораторной установки. Внедрение результатов исследования подтверждено Актами внедрения.

**На защиту выносятся.**

Положения научной новизны, практической значимости, а также результаты и выводы по работе.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность научных положений работы подтверждена сравнением результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Расхождение полученных результатов не превышает 5 %.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на: научно-практической конференции «Локомотивы. Газомоторное топливо» (г. Самара, 2016г., СамГУПС); третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г.Омск, 2016г., ОмГУПС); X Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту (г. Самара, 2017г., СамГУПС); Международной научно-исследовательской конференции «Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития» (Оренбург, 2017); VIII Международной научно-

практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Республика Беларусь, г.Гомель, 2017г.); Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018» (г. Москва, 2018г., МГТУ им. Н.Э. Баумана).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе статей – 17, из них 1 – в журнале, входящего в базу Scopus и Web of Science, 9 – в ведущих научных изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 5 – в материалах всероссийских и международных конференций, две – в зарубежных научных изданиях, получены два патента на полезные модели.

**Структура и объем работы.** Диссертация общим объемом 210 страниц состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка из 130 наименований, в том числе зарубежных – 40, шести приложений и содержит 167 страниц основного текста, 20 таблиц, 53 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведены актуальность, научная новизна и краткая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** рассматривается обоснование необходимости использования природного газа в тепловозных дизелях, приведён аналитический обзор работ, посвящённых теоретическому и экспериментальному изучению конвертации тепловых двигателей на природный газ, выполненных отечественными научными коллективами ВНИИЖТа, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, ОмГУПСа, РУДН, МАДИ, ТГУ, СамГУПСа в лице Е.Е. Коссова, В.В. Фурмана, В.А. Маркова, Р.З. Кавтарадзе, Н.Н. Патрахальцева, А.С. Хачияна, В.Г. Камалтдинова, Е.А. Лазарева, Е.И. Сковородникова, А.П. Шайкина, Д.Я. Носырева, А.Д.

Рослякова, Ю.И. Булыгина и др., а также зарубежными учеными в лице Andreassi L., Dietrich W.R., Golub A., Johansson B., Deltoro A., Woschni G. и др. В работах приводятся особенности организации рабочего цикла, а также изменение конструктивных и регулировочных факторов двигателей. Проанализированы работы ряда ведущих исследовательских институтов, крупных отечественных и зарубежных компаний: АО «ВНИИЖТ», ОАО «ВНИКТИ», АО «УК «БМЗ» Брянский машиностроительный завод, ОАО «Коломенский завод», ООО «ППП Дизельавтоматика», Воронежский ТРЗ ОА «Желдорремаш», АО «ЛТЗ» Людиновский тепловозостроительный завод, BNSF, Union Pacific, Norfolk Southern, Canadian National, GE «Transportation» и EMD «Caterpillar».

Для решения проблемы повышения энергоэкономических и экологических показателей дизелей тепловозов при подаче природного газа к дизельному топливу путем организации рабочего цикла по принципу внутреннего смесеобразования исходя из преимуществ простоты переоборудования необходима разработка системы подачи, смешивания и дозирования природного газа.

**Во второй главе** усовершенствована математическая модель, учитывающая низшую теплоту сгорания смесового топлива в зависимости от доли замещения дизельного топлива и низшей теплотворной способности природного газа для оценки показателей работы тепловозных дизелей.

Доля метана в составе природного газа может изменяться в широком диапазоне, т.е. от 75 до 99 %. В связи с этим, разработана методика расчета теплоты, выделившейся при сгорании смесового топлива с учетом компонентного состава природного газа, позволяющая получить оптимальные показатели работы дизелей тепловозов. При расчете суммарного количества тепла, подведенного при сгорании смесового топлива, учтено влияние концентрации метана в природном газе

различных месторождений и введен коэффициент компонентного состава  $K_0$ , величина которого оценена эмпирически, по результатам обработки протоколов испытаний.

Уравнение для определения относительного количества тепла, выделившегося при сгорании смесового топлива с учетом коэффициента компонентного состава  $K_0$  примет вид:

$$q = \frac{G_T \cdot H_{удг}}{(K_0 \cdot V_{пг} \cdot H_{упг} + G_T \cdot H_{удг})}, \quad (1)$$

где  $K_0 = f(H_u)$  - коэффициент компонентного состава;

$G_T$  – расход топлива дизелем, м<sup>3</sup>/час;

$H_{удг}$  – низшая теплотворность дизельного топлива, МДж/м<sup>3</sup>;

$H_{упг}$  – низшая теплотворность природного газа, МДж/м<sup>3</sup>;

$V_{пг}$  – приведенный часовой расход природного газа, м<sup>3</sup>/час.

Коэффициент компонентного состава  $K_0$  – это безразмерная величина, которая показывает изменение теплотворной способности природного газа в зависимости от его месторождения.

$$K_0 = \frac{H_{упгфакт}}{H_{упгср}}, \quad (2)$$

где,  $H_{упгфакт}$  – фактическая теплотворная способность природного газа (указывается в паспорте месторождения), МДж/м<sup>3</sup>;

$H_{упгср}$  – средняя по выборке теплотворная способность природного газа по месторождениям, МДж/м<sup>3</sup>.

После обработки протоколов испытаний с различных месторождений природного газа получена зависимость теплоты сгорания  $H_{упгфакт}$  от содержания метана в природном газе (рис. 1). Так как диапазон содержания метана в природном газе равен 75-99%, то для обеспечения его

теплоты сгорания равной  $35,8 \text{ МДж/м}^3$  коэффициент компонентного состава должен быть в пределах  $0,92-1,08$ .

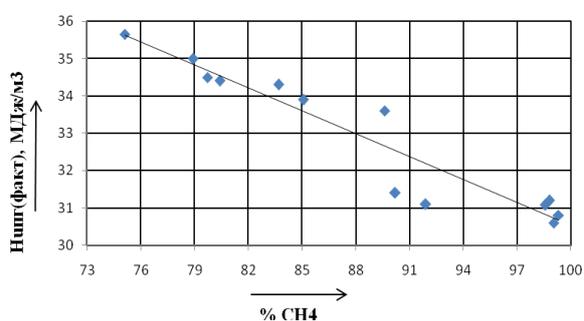


Рисунок 1 – Зависимость фактической теплоты сгорания природного газа  $H_{u(факт)}$  от содержания в нем метана  $CH_4$

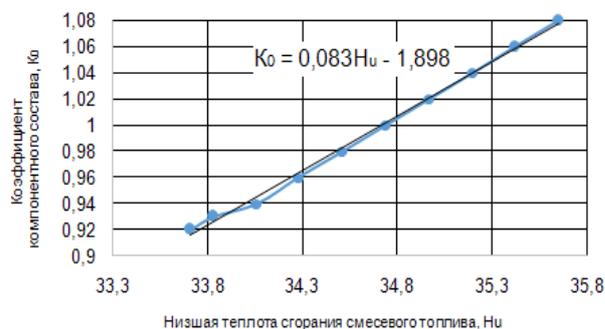


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента компонентного состава  $K_0$  от низшей теплоты сгорания смеси  $H_u$

Данный диапазон коэффициента  $K_0$  целесообразно использовать при настройке дизелей тепловозов, работающих на смеси топлива, что позволяет получить оптимальные характеристики удельного эффективного расхода дизельного топлива. Если содержание метана в мольных долях в смеси топлива больше, то теплотворная способность смеси меньше, что приводит к необходимости увеличения объема подаваемого топлива и корректировке регулировочных трендов с помощью автоматизированных систем управления (АСУ).

Таким образом, целесообразно регулировку расхода топлива осуществлять с учетом фактической теплоты сгорания. Так как  $H_{u(факт)}$  не имеет среднего постоянного значения, например, среднее по выборке  $H_{u(факт)} = 33,01 \text{ МДж/м}^3$ , меняется в зависимости от компонентного состава природного газа. Для сохранения номинальной мощности дизеля при подаче природного газа его цикловая подача должна быть эквивалентной теплоте сгорания замещаемого дизельного топлива. Учитывая разницу объемных теплотворных способностей обоих видов топлив ( $H_{u(д)} = 33,06 \text{ МДж/м}^3$  и  $H_{u(п)} = 35,8 \text{ МДж/м}^3$ ), выполним для этого следующее условие:

$$\Delta V_T H_{u_{дг}} = \Delta V_{пг} H_{u_{пг}} \quad (3)$$

где  $\Delta V_T$  и  $\Delta V_{пг}$  - объемная подача соответственно дизельного топлива и природного газа на один цикл, м<sup>3</sup>;

$H_{u_{дг}}$  и  $H_{u_{пг}}$  - низшая теплота сгорания соответственно дизельного топлива и природного газа, МДж/м<sup>3</sup>.

Таким образом, используя низшую теплоту сгорания, найдем необходимое количество подаваемого природного газа и дизельного топлива.

Из условия (3) найдем объем природного газа на один рабочий цикл при допущении, что сгорание обоих видов топлив происходит с одинаковой эффективностью:

$$\Delta V_{пг} = \Delta V_T \frac{H_{u_{дг}}}{H_{u_{пг}}} \quad (4)$$

Для каждого дизеля  $\Delta V_{пг}$  напрямую зависит от цикловой подачи топлива. Максимальной мощности дизеля 6ЧН31/36 соответствует цикловая подача дизельного топлива  $q_u = 1,52$  г/цикл, что при удельной массе топлива  $\gamma = 840$  кг/м<sup>3</sup> составляет объемную подачу  $\Delta V_T = 1,81 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>. Приняв изменения низшей теплоты сгорания смесей дизельного топлива с природным газом по аддитивному закону, рассчитаем необходимый объем топлива  $\Delta V_T$ , который подается в цилиндр на один рабочий цикл (табл. 1).

Варьируя составом топлива путем изменения содержания природного газа в диапазоне от 1 до 90 % от общего количества подаваемого топлива, рассчитаем параметры подачи смесевое топлива с учетом коэффициента компонентного состава  $K_0$  природного газа (рис. 2). Из таблицы 1 видно, что при замещении дизельного топлива природным газом теплотворная способность смесевое топлива растет, поэтому действительная объемная подача природного газа должна быть снижена примерно на 10%. Причиной этому является различие в теплотворной способности дизельного топлива и природного газа.

Таблица 1

Параметры подачи смесового топлива на номинальном режиме работы дизеля 6ЧН31/36

Параметр	Состав смесового топлива										
	ДТ	5 % ПГ + 95% ДТ	10 % ПГ + 90% ДТ	20 % ПГ + 80% ДТ	30 % ПГ + 70% ДТ	40 % ПГ + 60% ДТ	50 % ПГ + 50% ДТ	60 % ПГ + 40% ДТ	70 % ПГ + 30% ДТ	80 % ПГ + 20% ДТ	90 % ПГ + 10% ДТ
Низшая теплота сгорания $H_u$ , МДж/м <sup>3</sup>	33,06	33,71	33,83	34,06	34,28	34,51	34,74	34,97	35,20	35,42	35,65
Коэффициент $K_0$	-	0,92	0,93	0,94	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08
Отношение $H_{u_{ДТ}} / H_{u_{СМЕСИ}}$	-	0,981	0,977	0,971	0,964	0,958	0,952	0,945	0,939	0,933	0,927
Объем топлива на один цикл $V_T$ , (м <sup>3</sup> ·10 <sup>-6</sup> )	1,81	1,72	1,629	1,448	1,267	1,086	0,905	0,724	0,543	0,362	0,181
Объем газа на один цикл $V_{ПГ}$ , (м <sup>3</sup> ·10 <sup>-6</sup> )	-	88,4	176,8	353,6	530,4	707,2	884	1060,8	1237,6	1414,4	1591,2
Масса топлива на один цикл $q_{ц}$ , гр	1,52	1,44	1,37	1,22	1,06	0,91	0,76	0,61	0,46	0,31	0,15

На основе математической модели А.С. Орлина, для тепловозного дизеля использована нульмерная термодинамическая модель расчета рабочего цикла при работе дизеля с добавкой природного газа к дизельному топливу. Расчет рабочего цикла, индикаторных и эффективных показателей дизеля 6ЧН31/36 произведен с учетом коэффициента  $K_0$  по предложенной модели.

Удельный эффективный расход смесового топлива дизелем при этом определялся по формуле:

$$b_e = 3600 \cdot \frac{q}{\eta_e \cdot H_{u_{ДТ}}}, \quad (5)$$

С целью проверки адекватности разработанных выше положений методики (уравнения 1-4) произведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Расхождение полученных результатов не превышает 5 %.

В третьей главе представлены технические решения для конвертации дизелей тепловозов на смесевое топливо.

Для повышения эффективности работы дизелей тепловозов на смесевом топливе разработана система топливоподачи, обеспечивающая внутреннее смесеобразование с высокими эксплуатационными качествами за счет автономного управления линиями подачи природного газа и дизельного топлива (рис. 3).

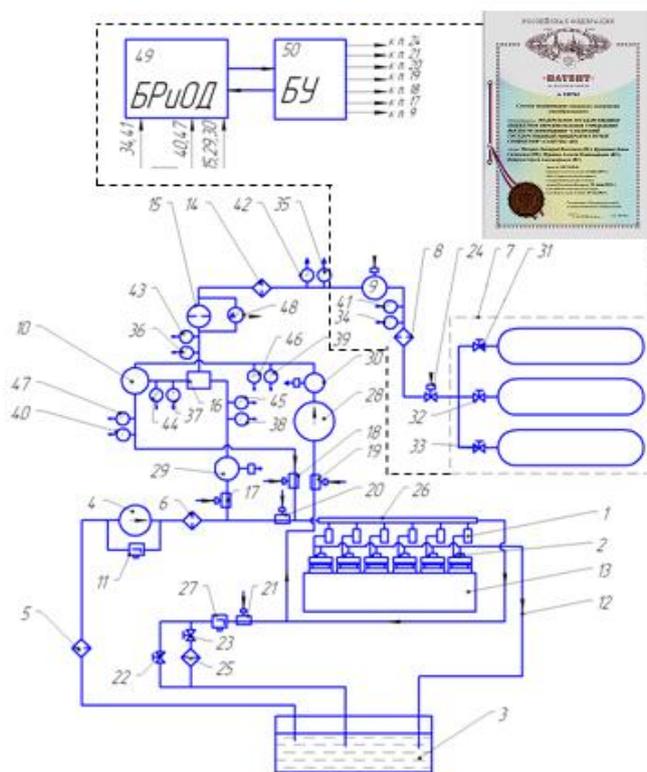


Рисунок 3 – Система топливоподачи дизеля тепловоза для работы на смесевом топливе

1 - топливный насос высокого давления; 2 - топливные форсунки; 3 - топливный бак; 4 - топливоподкачивающий насос; 5 - фильтр грубой очистки; 6 - фильтр тонкой очистки; 7 - баллонная раampa; 8 - фильтр грубой очистки метана; 9 - редуктор; 10 - смеситель циркуляционного контура; 11 - редукционный клапан; 12 - линия утечки дизельного топлива; 13 - дизель; 14 - фильтр тонкой очистки природного газа; 15 - электроуправляемый дроссельный расходомер; 16 - смеситель контура подпитки; 17, 18, 19, 20, 21 - электроуправляемые клапаны; 22, 23 - вентили перепуска топлива; 24 - электроуправляемый клапан рамп; 25 - топливный подогреватель; 26 - топливный коллектор; 27 - подпорный клапан; 28 - подкачивающий насос смеси; 29, 30 - расходомер; 31, 32, 33 - ручные запорные вентили; 34, 41 - первая пара датчиков температуры и давления; 35, 42 - вторая пара датчиков температуры и давления; 36, 43 - третья пара датчиков температуры и давления; 37, 44 - четвертая пара датчиков температуры и давления; 38, 45 - пятая пара датчиков температуры и давления; 39, 46 - шестая пара датчиков температуры и давления; 40, 47 - седьмая пара датчиков температуры и давления; 48 - датчик перепада давления; 49 - блок регистрации и обработки данных; 50 - блок управления.

Изменение режимов работы системы обеспечивается электроуправляемыми клапанами, блоком регистрации и обработки данных и блоком управления. Природный газ подается из топливной рамп; общей емкостью 270 литров с давлением 175 бар с выходом на редуктор, давление контролируется манометром. Для автоматизации процесса регулирования подачи газа в системе предусматривается установка электроуправляемых и электромагнитных клапанов.

Для реализации способа подачи природного газа непосредственно в дизельное топливо и получения высокодисперсной однородной смеси разработано перемешивающее устройство, которое входит в систему подачи топлива. Выполнен расчет площадей проходных сечений камеры закручивания каналов подвода дизельного топлива в смесителе и природного газа.

На основании выполненных расчетов в программном комплексе *SolidWorks* с использованием модуля газодинамического анализа *Flow Simulations* проведен расчет скоростей дизельного топлива и природного газа внутри смесителя, построена диаграмма распределения скоростей и траекторий движения смешиваемого потока (рис. 4). Действительная скорость истечения меньше теоретической вследствие потерь на трение. Эти потери учитываются в коэффициенте расхода  $\mu$ , значения которого находятся в пределах  $\mu = 0,62 - 0,8$ .

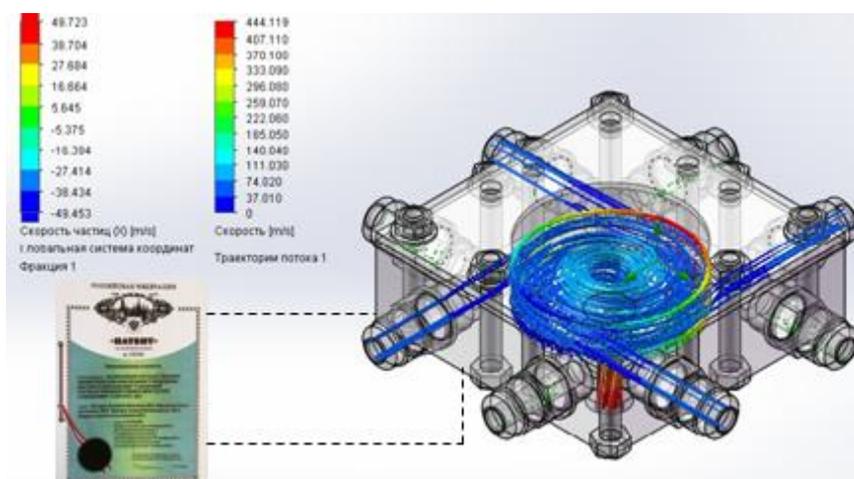


Рисунок 4 – Распределение потоков дизельного топлива и природного газа в перемешивающем устройстве

Растворимость природного газа в дизельном топливе оценивается величиной  $m_{\text{пг}} = 0,10-0,14\%$ . Конструкция смесителя позволяет повысить степень однородности смесового топлива при перемешивании, повысить эффективность энергетических установок за счет цилиндрической камеры закручивания и чередующихся тангенциально расположенных отверстий

со штуцерами-жиклерами подачи дизельного топлива и природного газа, в которых установлены шнековые завихрители.

**В четвертой главе** представлены результаты по оценке влияния доли замещения дизельного топлива природным газом на показатели работы дизеля 6ЧН31/36. Экспериментальные исследования проводились в условиях станции реостатных испытаний и пункта экологического контроля СЛД «Орск».

Выявлены зависимости удельного эффективного расхода дизельного топлива дизеля 6ЧН31/36 при замещении дизельного топлива природным газом в количестве 5%. Удельный эффективный расход дизельного топлива ( $b_e$ ) снизился в среднем на 8-12 % в зависимости от режима работы дизеля (рис. 5).

Проведенный эксперимент показывает, что уменьшение удельного эффективного расхода дизельного топлива возможно лишь под нагрузкой.

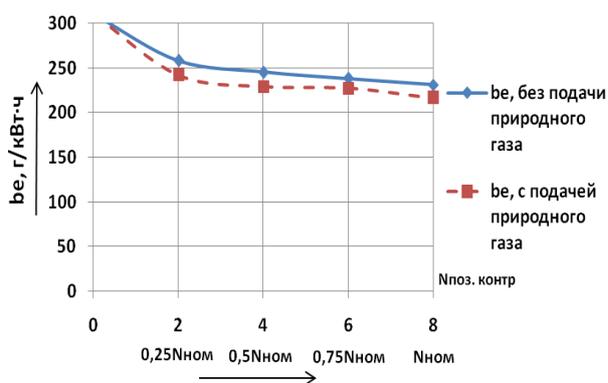


Рисунок 5 – Изменение удельного эффективного расхода дизельного топлива дизеля 6ЧН31/36 при работе на смесевом топливе

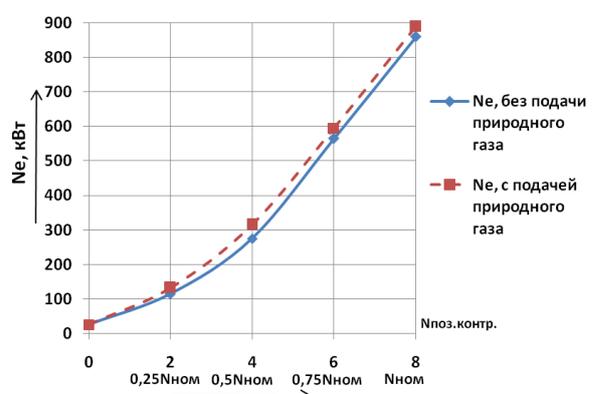


Рисунок 6 - Изменение эффективной мощности при работе дизеля 6ЧН31/36 на смесевом топливе

На холостом ходу дизель работает по дизельному циклу, так как процесс сгорания природного газа нестабилен (невысокие температуры и давления рабочего цикла). На рисунке 6 показано увеличение эффективной мощности дизеля в зависимости от режима работы в среднем на 2-4 % при подаче природного газа к дизельному топливу, не превышая пределы паспортных значений, заложенных конструкцией дизеля.

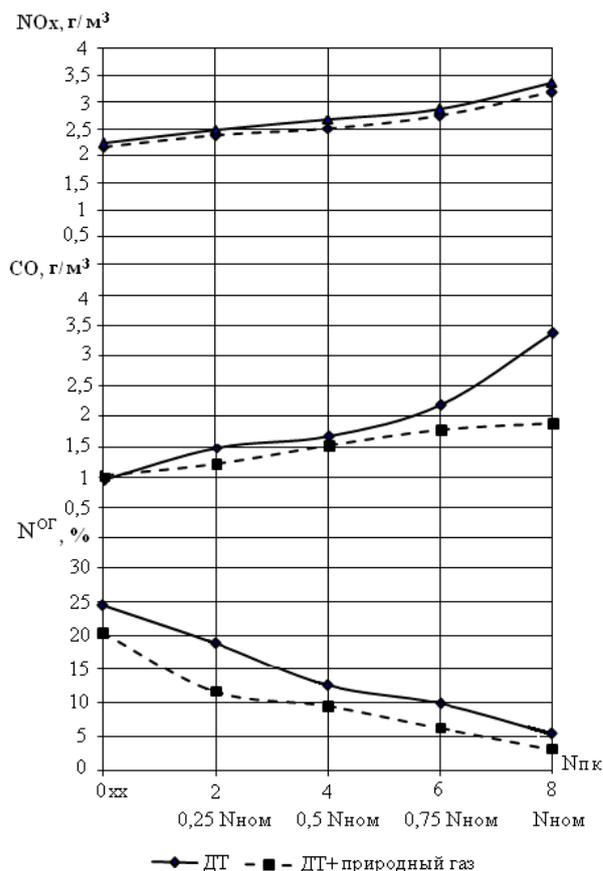


Рисунок 7 – Экологические характеристики дизеля 6ЧН31/36 при работе на смешанном топливе

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 7 показывает, что при 5%-ом замещении дизельного топлива природным газом в зависимости от номинальной мощности дизеля наблюдается снижение вредных выбросов: оксидов углерода (CO) в среднем на 6-8%, оксидов азота (NOx) в среднем на 4-6%, а дымности отработавших газов (N<sup>OG</sup>) в среднем на 5-10%.

В качестве определяющего параметра в механизме влияния природного газа на энергоэкономические и

экологические показатели работы дизеля тепловоза принято отношение Н/С.

При увеличении доли природного газа в дизельном топливе происходит снижение удельного эффективного расхода дизельного топлива, вредных выбросов и увеличение эффективной мощности (рисунки 8-11). Это обусловлено существенным влиянием доли природного газа как водородосодержащего газа на характеристики процесса горения. Сравнивая результаты экспериментальных данных собственных исследований по замещению дизельного топлива природным газом с отечественными и зарубежными данными можно сделать вывод об адекватности проведенного исследования по применению смешанного топлива на дизеле 6ЧН31/36.

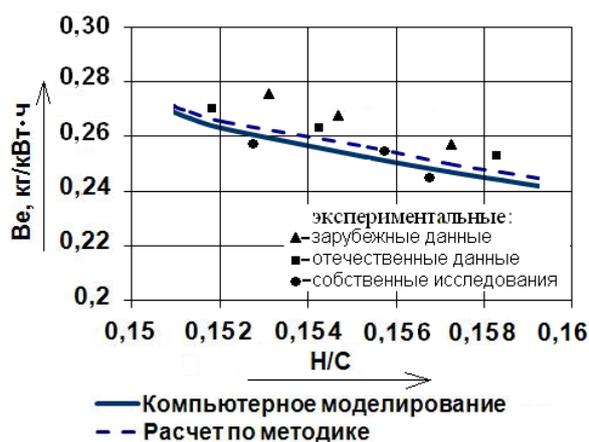


Рисунок 8 – Изменение удельного эффективного расхода дизельного топлива дизеля 6ЧН31/36 при 5%-ном замещении топлива природным газом

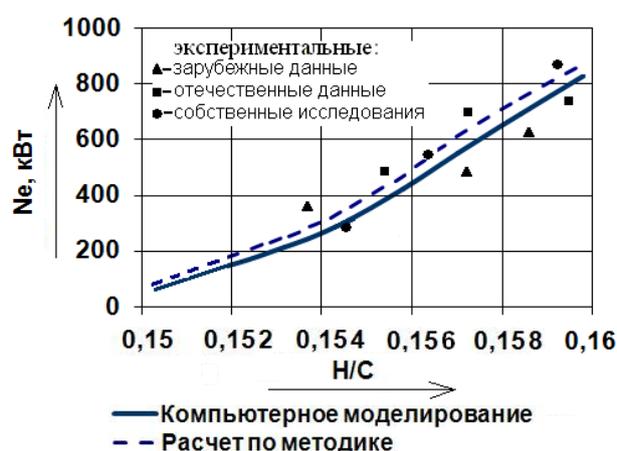


Рисунок 9 – Изменение эффективной мощности дизеля 6ЧН31/36 при 5%-ном замещении топлива природным газом

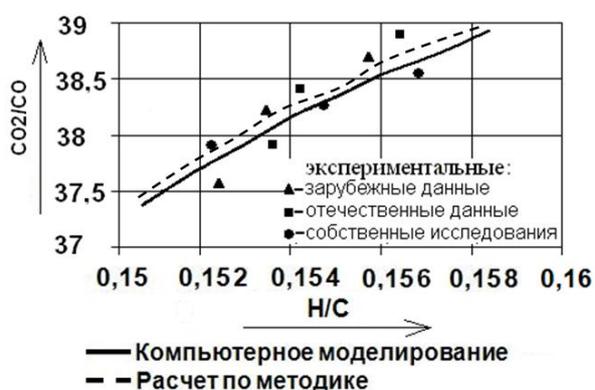


Рисунок 10 – Зависимость соотношения  $CO_2/CO$  от  $H/C$  при 5%-ном замещении дизельного топлива природным газом

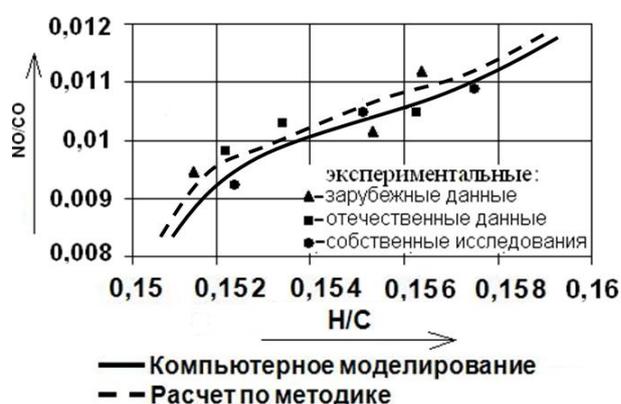


Рисунок 11 – Зависимость соотношения  $NO_x/CO$  от  $H/C$  при 5%-ном замещении дизельного топлива природным газом

В полной мере эффект от добавки природного газа можно наблюдать на совмещенных индикаторных диаграммах, приведенных на рисунке 12. Получены они с помощью расчетно-вычислительного эксперимента по предложенной методике и компьютерной программе *ENGINE*.

Из графика видно, что при работе дизеля на смесевом топливе при установочном угле опережения топлива 18 град до ВМТ, частоте вращения коленчатого вала  $750 \text{ мин}^{-1}$  сгорание получается относительно плавным, приближенным к изобарному процессу. При этом максимальное давление цикла уменьшилось на 0,29 МПа или на 3,3 %, а снижение жесткости составило 1,7%.

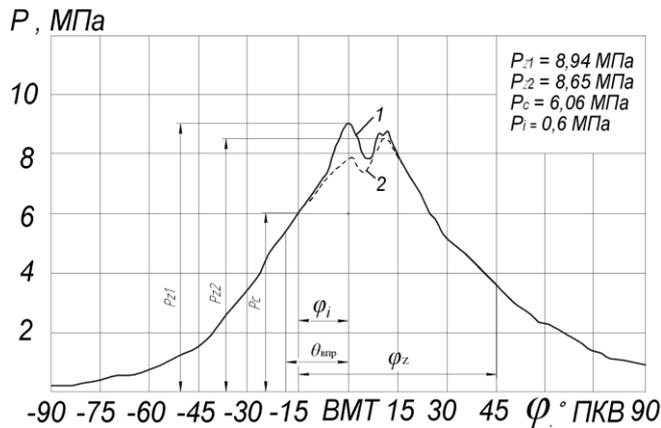


Рисунок 12 – Индикаторные диаграммы при работе дизеля 6ЧН31/36 на дизельном топливе (1) и смесевом топливе (2)

дизельном топливе и с добавкой природного газа соответствующие номинальному режиму работы дизеля.

Результаты исследований показали снижение давления и температуры от добавки природного газа, что положительно сказывается на динамической нагруженности деталей кривошипно-шатунного механизма и подшипников коленчатого вала дизеля.

Основной эффект от добавки природного газа к дизельному топливу заключается в интенсификации физических процессов испарения, нагрева и смешения дизельного топлива.

На рисунке 13 представлены кривые тепловыделения при испытании дизеля 6ЧН31/36 на

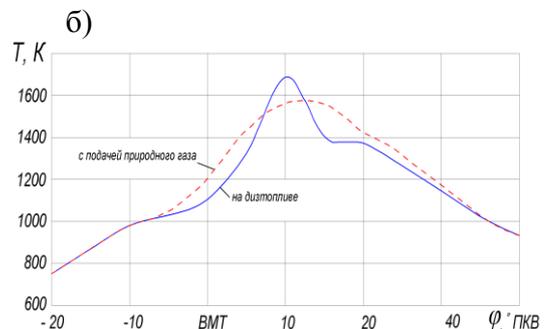
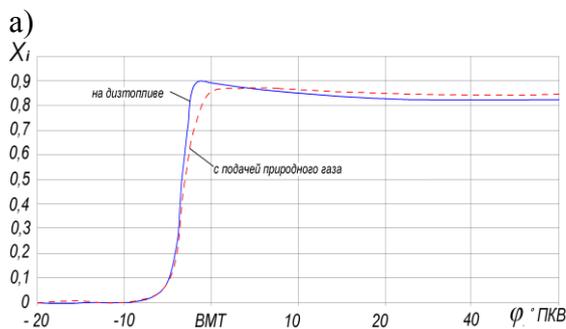


Рисунок 13 – Кривые тепловыделения (а) и температуры газов (б) при работе дизеля 6ЧН31/36 на дизельном топливе и смесевом топливе

С целью определение взаимосвязи между показателями работы дизеля 6ЧН31/36 и составом смесевого топлива, на основе обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов с использованием программы STATISTICA6 получены уравнения регрессии (табл. 2).

Таблица 2

Уравнения регрессии, описывающие изменение эколого-экономических показателей работы дизеля 6ЧН31/36 в зависимости от доли (D) природного газа

Параметр	Аналитические выражения	$F_{on} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$	$F_T$	Адекватность модели
$b_e$ , г/кВт·ч	$b_e = 340,5 - 0,369N_e - 24,45D + 0,0003N_e^2 + 0,0096N_eD + 0,969D^2$	0,046	2,27	адекватна
CO, г/м <sup>3</sup>	$CO = 0,06 + 0,01N_e - 0,1077D - 5,61 \cdot 10^{-6}N_e^2 - 0,0003N_eD + 0,074D^2$	0,224	5,14	адекватна
NO <sub>x</sub> , г/м <sup>3</sup>	$NO_x = 0,07 + 0,0006N_e - 0,01D + 1,5 \cdot 10^{-6}N_e^2 + 0,0001N_eD + 0,012D^2$	0,531	6,6	адекватна
N <sup>OI</sup> , %	$N^{OI} = 35,02 - 0,01N_e - 3,81D + 7,3 \cdot 10^{-5}N_e^2 + 0,0001N_eD + 1,46D^2$	0,203	4,76	адекватна

На основании полученных уравнений регрессии и установленных взаимосвязей между удельным эффективным расходом дизельного топлива и эффективной мощностью в зависимости от доли природного газа в дизельном топливе, произведен расчет указанных характеристик дизеля тепловоза в зависимости от режима работы с учетом коэффициента компонентного состава  $K_0$  (рис. 14) с целью определения эффективности использования смесового топлива.

Оптимальные расчетные значения показателей работы дизеля тепловоза при замещении дизельного топлива природным газом

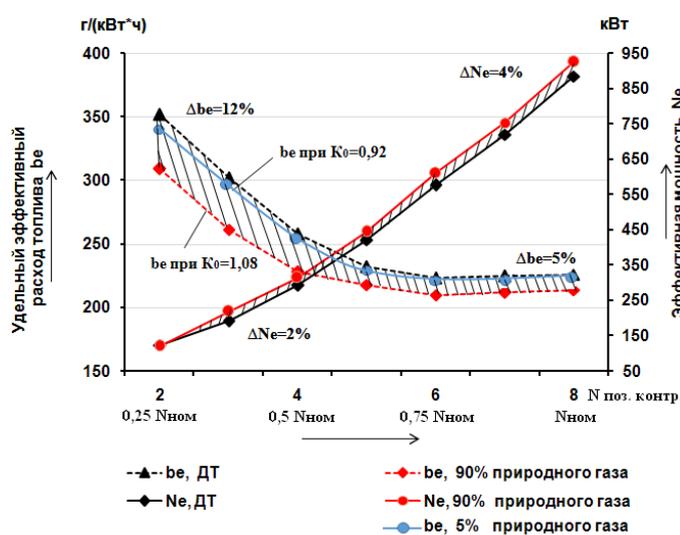


Рисунок 14 - Показатели работы дизеля 6ЧН31/36 на смесовом топливе в зависимости от режима работы с учетом коэффициента  $K_0$

наблюдаются при коэффициенте компонентного состава природного газа  $K_0=1,08$ .

Проведенные исследования показывают, что при прочих равных условиях, учитывая коэффициент компонентного состава  $K_0$ , произойдет повышение мощности, но с учетом требований Правил технической эксплуатации на тепловоз и инструкций по

реостатным испытаниям должна быть выдержана требуемая паспортная мощность, при этом, как следствие, необходимо уменьшить расход топлива, чтобы компенсировать расчетное повышение мощности.

**В пятой главе** произведен расчет ожидаемого экономического эффекта от применения смесового топлива на дизеле тепловоза ЧМЭЗ, который составил в расчете на один маневровый тепловоз ЧМЭЗ – 981тыс. руб. (только за счет снижения расхода и затрат на топливо). Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения топливоподающей системы за счет снижения расхода топлива и повышения эффективности использования дизеля тепловоза ЧМЭЗ в первый год эксплуатации составит 483610 руб. в год на один тепловоз (в ценах 2018г.).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Обобщены и проанализированы данные по особенностям применения природного газа в тепловозных дизелях. Установлено, что способ смешения КППГ с дизельным топливом позволяет улучшить качество распыла и сгорания путем дополнительного разрушения топливной струи продуктами горения газа, что способствует разрушению струи дизельного топлива и более тонкому и однородному распыливанию с множеством начальных очагов воспламенения.

2. Усовершенствована математическая модель, учитывающая низшую теплоту сгорания смесового топлива в зависимости от доли замещения дизельного топлива и низшей теплотворной способности природного газа различных месторождений для оценки показателей работы тепловозных дизелей. Действительная объемная подача природного газа может быть снижена примерно на 10% в связи с ростом теплотворной способности смесового топлива.

3. Разработана методика расчета теплоты, выделившейся при сгорании смесового топлива с учетом компонентного состава природного газа, указанного в паспорте при заправке тепловоза, позволяющая периодически уточнять программу регулирования системы управления подачи топлива по режимам работы путем введения коэффициента компонентного состава.

Установлено, что для обеспечения теплоты сгорания метана равной 35,8 МДж/м<sup>3</sup> коэффициент компонентного состава  $K_0$  должен быть в пределах 0,92-1,08.

4. Разработана система подачи смесового топлива (Патент № 180762 от 22.06.2018г.) и выполнен расчет характеристик разработанного перемешивающего устройства (Патент № 174710 от 30.10.2017г.) для растворимости природного газа в дизельном топливе, которая оценивается величиной  $m_{\text{пг}} = 0,10-0,14\%$ .

5. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что замещение дизельного топлива природным газом в диапазоне 1-90% при работе дизеля 6ЧН31/36 на номинальном режиме приводит к повышению мощности в среднем на 2-5% при снижении удельного эффективного расхода дизельного топлива от 8 до 12%, снижению выбросов СО в среднем на 8-12%, NO<sub>x</sub> в среднем на 6-10%, а N<sup>OG</sup> в среднем на 15-20% в зависимости от режима работы дизеля при этом, оптимальные расчетные значения показателей эффективности дизеля тепловоза наблюдаются при коэффициенте компонентного состава  $K_0=1,08$ . Получены сравнительные результаты энергоэкономических и экологических показателей в зависимости от нагрузки с оптимальной долей замещения дизельного топлива природным газом для расчетного оптимального планирования эффективной работы дизелей тепловозов и выбора рациональных регулировочных решений рабочего цикла.

6. Результаты расчетно-экспериментальных исследований показали снижение давления и температуры от добавки природного газа, что положительно сказывается на динамической нагруженности деталей кривошипно-шатунного механизма и подшипников коленчатого вала. Сопоставление индикаторных диаграмм и кривых тепловыделения показало, что при добавке природного газа в дизельное топливо

максимальное давление цикла уменьшилось на 0,29 МПа или на 3,3 %, жесткость рабочего процесса уменьшилась на 1,7 %.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Публикации в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science:**

1. Nosyrev D.Ya., **Kurmanova L.S.**, Petukhov S.A., Muratov A.V., Erzamaev M.P. Environmental Efficiency of Using Alternative Types of Fuel in Power Facility of Railway Transport // Ecology and Industry of Russia, 2019. – Vol. 23. Iss. – 2. – P. 19-23. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-19-23

**Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

2. Носырев Д.Я. Булыгин Ю.И., **Курманова Л.С.** Расчетно-экспериментальная оценка эффективности использования смеси дизельного топлива и природного газа в тепловозных дизелях // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 1(73). – С. 118-125.

3. **Курманова Л.С.** Способы организации рабочего цикла в тепловых двигателях для работы на смеси дизельного топлива и природного газа // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 6(72). – С. 111-120.

4. Носырев Д.Я., Булыгин Ю.И., **Курманова Л.С.** Улучшение энергоэкономических показателей дизелей тепловозов путем применения смеси дизельного топлива и природного газа // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 1(73). – С. 110-117.

5. Носырев Д.Я., Муратов А.В., **Курманова Л.С.**, Петухов С.А. Оценка экономичности тягового автономного подвижного состава при использовании природного газа в качестве моторного топлива // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 2 (62). – С. 34-38.

6. Носырев Д.Я., Муратов А.В., **Курманова Л.С.**, Петухов С.А. Экспериментальная оценка влияния природного газа на работу

энергетических установок рельсовых автобусов // Вестник транспорта Поволжья. –2017. – № 4(64). – С. 38-41.

7. **Курманова Л.С.** Повышение эффективности работы тепловозов путем применения газомоторного топлива // Известия Транссиба. –2017. – № 3(31). – С. 20-27.

8. Носырев Д.Я., Балакин А.Ю., Петухов С.А., **Курманова Л.С.** Оценка влияния соотношения углерода к водороду на теплофизические свойства композитных топлив для работы тепловозных дизелей // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 2(56). – С. 33-38.

9. Носырев Д.Я., Муратов А.В., **Курманова Л.С.**, Петухов С.А. Влияние насыщения дизельного топлива метаном на эксплуатационные показатели тепловозных дизелей // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6 (60). – С. 25-28.

10. Носырев Д.Я., Муратов А.В., Петухов С.А., **Курманова Л.С.** Проблемы и перспективы эксплуатации газотепловозов на Куйбышевской железной дороге - филиале ОАО «РЖД» // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 5(47). – С. 20-23.

#### **Авторские свидетельства, патенты:**

11. Патент № 174710 на полезную модель Российская Федерация МПК<sup>7</sup> B01F5/00. Перемешивающее устройство / Д.Я. Носырев, **Л.С. Курманова**, А.В. Муратов, С.А. Петухов (РФ). – 2017113782; заявл. 20.04.2017; опубл. 30.10.2017. – Бюл. № 31.

12. Патент № 180762 на полезную модель Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F02B43/00. Система топливоподачи газодизеля с внутренним смесеобразованием / Д.Я. Носырев, **Л.С. Курманова**, А.В. Муратов, С.А. Петухов (РФ). – 2017118141; заявл. 25.05.2017; опубл. 22.06.2018. – Бюл. № 18.

Кроме перечисленных работ, в диссертации использованы материалы еще 7 научных публикаций автора.

Курманова Лейла Салимовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ  
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА  
И ПРИРОДНОГО ГАЗА

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.03.2019. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. 1. Тираж 100 экз. Заказ 57.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080. г. Челябинск, проспект Ленина, 76.