

На правах рукописи



ЗУЕВ Никита Сергеевич

**УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ДИЗЕЛЬНОМ
БИОТОПЛИВЕ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Козлов Андрей Викторович (ФГУП «НАМИ»)

Официальные оппоненты:

Ерохов Виктор Иванович
 доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры «Экологическая безопасность
 технических систем»,
 ФГБОУ ВО «Московский политехнический
 университет»

Савастенко Андрей Александрович
 кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные
 двигатели»,
 ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
 государственный технический университет
 (МАДИ)»

Ведущая организация:

**Российский государственный аграрный
 университет – МСХА имени
 К.А. Тимирязева
 (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени
 К.А. Тимирязева)**

Защита диссертации состоится «01» декабря 2021 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте [www.nami.ru](http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council) по ссылке: <http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присыпать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «28» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета
 к.т.н., доцент

Курмаев Ринат Ханяфьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Существующая стратегия снижения выбросов парниковых газов транспортного сектора не позволяет выполнить требования климатической доктрины, установленные до 2030 и 2050 гг., поэтому политика многих стран направлена на увеличение производства и применения биотоплив, благодаря чему в транспортном секторе биотоплива занимают лидирующее место среди возобновляемых источников энергии. На дорожный транспорт приходится около 75% мирового потребления энергии транспортного сектора по данным на 2018 г., в свою очередь на пассажирский транспорт приходится около двух третей от этого значения. Результатом увеличивающегося потребления энергии является глобальное увеличение выбросов парниковых газов, основу которых составляет CO₂, на транспортный сектор приходилась почти четверть выбросов парниковых газов в 2019 г. В сфере дорожного транспорта наблюдается тенденция к увеличению применения биотоплив – в Индонезии поставлена цель достигнуть минимальной доли содержания дизельного биотоплива в смесевом топливе, равной 30%, во Франции – 7,9% в 2019 г. и 8,2% в 2020 г. В Финляндии планируют повысить долю биотоплив до 30% и биотоплив из водорослей до 10% к 2029 году, в Бразилии одобрено применение топлива B11. В России также принят Федеральный закон № 296-ФЗ от 02.07.2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов».

Основными направлениями по снижению токсичности отработавших газов являются применение биотоплив как в чистом виде, так и в качестве смесей с нефтяными топливами, применение газовых топлив, в том числе биометана. Дизельное биотопливо (ДБТ) может быть применено в двигателях внутреннего сгорания без существенной модернизации топливной аппаратуры, так как его физические и химические свойства наиболее близки к свойствам нефтяного дизельного топлива среди существующих альтернативных топлив.

Для снижения токсичности отработавших газов также применяются современные процессы низкотемпературного горения, позволяющие снижать максимальную температуру цикла. Такие процессы могут быть организованы за счет применения многофазного впрыскивания и оптимизации его параметров, что может быть осуществлено при помощи компьютерных моделей в трехмерной постановке, основанных на методах вычислительной гидродинамики. Данный подход позволяет изменять регулировочные параметры топливоподачи (количество впрыскиваний топлива и параметры многофазного впрыскивания) в практически неограниченном диапазоне, в результате чего уменьшается время определения оптимальных значений регулировочных параметров и затраты на испытания.

Целью данной работы является совершенствование рабочего процесса автомобильного дизеля, работающего на дизельном биотопливе, для улучшения технико-экономических и экологических показателей.

Объектом исследования является автомобильный высоконагруженный дизель Ярославского моторного завода модели ЯМЗ-6566.

Предметом исследования является взаимосвязь внутрицилиндровых процессов с технико-экономическими и экологическими показателями дизеля, работающего на ДБТ.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследования. Для теоретических исследований использована компьютерная модель рабочего процесса дизеля, основанная на математических моделях вычислительной гидродинамики, описывающих внутрицилиндровые процессы. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными исследованиями дизеля на нефтяном дизельном топливе (ДТ) и ДБТ, проведенных на моторном стенде в боксе №24 ФГУП НАМИ, укомплектованным измерительным оборудованием согласно Правилам ООН №49, №85, №24 и ГОСТ 14846-2020.

Задачи исследования:

1. Разработка компьютерной модели рабочего процесса и процессов образования токсичных компонентов в цилиндре дизеля, работающего на ДБТ.
2. Теоретическое исследование внутрицилиндровых процессов при использовании различных стратегий впрыскивания ДБТ.
3. Экспериментальное исследование технико-экономических и экологических показателей дизеля при работе на ДБТ.
4. Оптимизация параметров многостадийного впрыскивания ДБТ с целью снижения концентрации токсичных компонентов отработавших газов.
5. Разработка рекомендаций по адаптации автомобильных дизелей для работы на ДБТ.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана трехмерная модель рабочего процесса дизеля, работающего на ДБТ, на основе математических моделей вычислительной гидродинамики.
2. Получены результаты теоретического анализа внутрицилиндровых процессов, процессов тепловыделения, образования оксидов азота и взвешенных частиц при работе дизеля на ДБТ в широких диапазонах варьирования количества впрыскиваний и параметров впрыскивания топлива.
3. Получены результаты экспериментальных исследований влияния ДБТ на технико-экономические и экологические показатели дизеля при работе на режимах внешней скоростной характеристики и стационарных режимах частичных нагрузок цикла Правил ООН №49.

Достоверность и обоснованность определяются:

1. Применением фундаментальных законов и уравнений теплофизики, газо- и гидродинамики, физической химии с соответствующими граничными условиями, современных численных методов реализации математических моделей, результатами валидации математических моделей.
2. Использованием современных, хорошо апробированных моделей внутрицилиндровых процессов, реализуемых в 3D-CFD коде AVL FIRE.
3. Применением достоверных экспериментальных данных по исследованию рабочего процесса дизеля ЯМЗ-6566, произведенных на моторном стенде в боксе №24 ФГУП «НАМИ».

Практическая значимость заключается в том, что:

1. Предложена методология выбора комбинации математических моделей, описывающих внутрицилиндровые процессы при работе на ДБТ, позволяющая создавать компьютерные модели, которые с высокой точностью описывают процессы горения топливовоздушной смеси и образования токсичных компонентов

отработавших газов, предназначенных для теоретического исследования рабочего процесса на альтернативных биотопливах.

2. Даны рекомендации по оптимизации параметров многостадийного впрыскивания дизельного биотоплива для организации низкотемпературного горения топливовоздушной смеси в цилиндре с целью одновременного снижения выбросов оксидов азота и взвешенных частиц с отработавшими газами при сохранении или увеличении топливной экономичности.

3. Даны рекомендации по адаптации автомобильных дизелей для работы на ДБТ, при этом достигается максимальная степень унификации со штатной топливной аппаратурой, предназначеннной для работы на нефтяном дизельном топливе.

Реализация результатов работы. Основные положения работы применяются в ПАО «ТМЗ» и АО «ЯЗДА» при конструировании топливной аппаратуры современных дизелей и во ФГУП НАМИ для расчета рабочего процесса ДВС при работе на альтернативных топливах.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа внутрицилиндровых процессов, процессов тепловыделения, образования оксидов азота и взвешенных частиц при работе дизеля на ДБТ в широких диапазонах варьирования количества впрыскиваний и параметров впрыскивания топлива.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния ДБТ на технико-экономические и экологические показатели дизеля при работе на режимах внешней скоростной характеристики и стационарных режимах частичных нагрузок цикла Правил ООН №49.

3. Методология выбора математических моделей, описывающих процессы приготовления топливовоздушной смеси, дробления топливного факела, нагрева и испарения капель топлива, процессы сгорания топливовоздушной смеси и образования токсичных компонентов отработавших газов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на Международной научно-технической конференции "Двигатель-2017", МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.); на Научно-технической конференции «Экология и энергоэффективность транспортных средств», в центре испытаний ФГУП «НАМИ», (Дмитров, 2017 г.); на Международной конференции AVL International Simulation Conference 22-24 October 2019, (Graz, Austria, 2019 г.); на Международной конференции AVL International Simulation Conference 22-24 June 2021, (Graz, Austria, 2021 г.).

Личный вклад:

1. Соискателем предложена комбинация математических моделей, описывающих внутрицилиндровые процессы при работе на ДБТ, позволяющая создавать компьютерные модели, которые с высокой точностью описывают процессы горения и образования токсичных компонентов отработавших газов.

2. Предложена методология определения параметров впрыскивания ДБТ на основе валидированной компьютерной модели рабочего процесса дизеля, влияющих на топливную экономичность и уровень токсичности отработавших газов, при этом определена оптимальная стратегия впрыскивания и оптимальные параметры стратегии впрыскивания для организации низкотемпературного горения ДБТ.

3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению влияния ДБТ на рабочий процесс дизеля и токсичность отработавших газов, также по определению оптимальных, с точки зрения топливной экономичности и токсичности отработавших газов, регулировочных параметров топливоподающей аппаратуры. Продемонстрирована практическая значимость полученных результатов.

Публикации. По материалам исследования опубликованы 9 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ и 2 статьи в изданиях Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, заключения, списка использованных источников литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 282 страницы машинописного текста, включая 104 рисунка, 38 таблиц, 77 формул, список использованных источников литературы из 220 наименований и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении проанализирована целесообразность и актуальность применения ДБТ в качестве моторного топлива, также целесообразность применения и организации процессов низкотемпературного горения топливовоздушной смеси. Обоснована актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертации.

В первой главе рассмотрена сырьевая база для производства ДБТ, оценены физические и химические свойства ДБТ (таблица 1) на основе наиболее распространенного сырья.

Таблица 1 – Свойства топлив

| Показатель | Дизельное топливо, ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009) Л/З | Дизельное биотопливо ДБТ (100% МЭРМ*) DIN EN 14214 |
|--|--|--|
| Низшая теплота сгорания, МДж/кг | 42,5 | 37,1 |
| Плотность, кг/м ³ , при 20 °C | 834 | 883 |
| Кинематическая вязкость, мм ² /с, при 20 °C | 3,0-6,0/1,8-5 | 8,0 |
| Температура, °C: | | |
| - помутнения | -5/-25 | - |
| - застывания | -1/-35 | -8 |
| Цетановое число, | 45 | 48 |
| Йодное число, г/100 г | 6,0 | - |
| Кислотность KOH, мг/100 см ³ | 0,05 | 0,5 |
| Температура самовоспламенения, °C | 250 | 230 |
| Содержание по массе, %: | | |
| - углерода | 86,4 | 77,5 |
| - водорода | 13,6 | 12,0 |
| - кислорода | 0,0 | 10,5 |

*МЭРМ – Метиловые эфиры рапсового масла

Рассмотрены и проанализированы особенности применения ДБТ в дизелях, процессы впрыскивания, дробления, нагрева и испарения топлива в камере сгорания на основе работ исследователей Desantes J.M., Pastor J.V., Hiroyasu H., Masahiro Shioji. Также произведен обзор работ, в которых рассмотрен процесс сгорания и

тепловыделения, произведена оценка выбросов токсичных компонентов отработавших газов на основе работ исследователей P.M. Najt, D.E. Foster, K. Nakagome, N. Shimazaki, K. Niimura, S. Kobayashi, Y. Iwabuchi. Представлены данные и произведен анализ влияния фазированного впрыскивания нефтяного ДТ и ДБТ на рабочий процесс дизеля Myung Yoon Kim, Seung Hyun Yoon, Chang Sik Lee. Проведена оценка возможности организации низкотемпературного горения за счет применения фазированного впрыскивания топлива Choi C.Y., Reitz R.D., Szybist J.P., Kirby S.R., Boehman A.L. Также проанализированы работы российских ученых Девянина С.Н., Патрахальцева Н.Н., Грехова Л.В., Вагнера В.А., Маркова В.А., Фомина В.М., Савастенко А.А., Кутенева В.Ф., Козлова А.В., Теренченко А.С., которые внесли существенный вклад в исследования применения биотоплив в ДВС. На основе произведенного анализа работ поставлена цель диссертационной работы и определены задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Вторая глава посвящена анализу и выбору комбинации математических моделей, обеспечивающих адекватное описание процессов дробления топливного факела, нагрева и испарения капли топлива, смесеобразования и сгорания, образования токсичных компонентов отработавших газов дизеля при работе на нефтяном ДТ и ДБТ на основе метиловых эфиров рапсового масла. Описан процесс построения расчетной сетки, выбор параметров, оказывающих решающее влияние на точность расчета. Описан процесс создания компьютерной модели рабочего процесса дизеля в трехмерной постановке на основе методов вычислительной гидродинамики и ее валидации.

Основные уравнения вычислительной гидродинамики, при помощи которых описывается течение жидкости:

- сохранения количества движения (Навье-Стокса):

$$\rho \frac{DW_i}{Dt} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right]; \quad (1)$$

- сохранения энергии (Фурье-Кирхгофа):

$$\rho \frac{DH_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} W_j) + G_j W_j + w_r Q_r + \frac{\partial q_{Rj}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

- диффузии (Фика):

$$\frac{DC_l}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_l \frac{\partial C_l}{\partial x_j} \right) + \dot{m}; \quad (3)$$

- сохранения массы (неразрывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot W_j) = 0, \quad (4)$$

где ρ – плотность кг/м³;

\vec{W} – вектор скорости, м/с;

\dot{m} – интенсивность источника массы (скорость изменения концентрации химического компонента, кг·м⁻³·с⁻¹);

p – давление, Па;

G_i – проекция вектора плотности объемных сил ($\text{Н}/\text{м}^3$) на ось Ox_i прямоугольной декартовой системы координат;

λ – теплопроводность, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$;

δ_{ij} – символ Кронекера;

H_i – полная удельная энергия, Дж/кг;

$\frac{\partial q_{Rj}}{\partial x_j}$ – радиационный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

τ_{ij} – касательные напряжения трения, Па;

Q_r – количество выделяемой теплоты на единицу массы, Дж/кг, в результате химической реакции, идущей со скоростью w_r , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

$\frac{D}{Dt}$ – субстанциональная производная;

C_l – концентрация компонента l , кг/м³;

D_l – коэффициент диффузии компонента l , м²/с;

$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right)$ – тензор вязких (турбулентных) напряжений,

определенный по осредненным значениям компонент скорости.

Уравнения (1-4) можно также записать в виде обобщённого закона сохранения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \cdot \Phi) + \operatorname{div}(\rho \vec{W} \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma_\Phi \operatorname{grad} \Phi) + S_\Phi, \quad (5)$$

где Φ – произвольная зависимая переменная;

Γ_Φ – коэффициент обмена (диффузии);

S_Φ – источниковый член, равный разности генерации $S_{\Phi g}$ и аннигиляции $S_{\Phi a}$ потоков, т.е. $S_\Phi = S_{\Phi g} - S_{\Phi a}$.

Турбулентное течение в ДВС до начала горения можно наблюдать в процессе приготовления топливовоздушной смеси, для описания которого выбрана модель k- ζ -f, одним из главных преимуществ которой является высокая точность, стабильность в расчетах с применением подвижных сеток и сильно сжатых потоков.

Модели сгорания и образования токсичных компонентов отработавших газов имеют очень тесную взаимосвязь. Наиболее подходящей моделью сгорания является модель ECFM 3Z, так как учитывает кинетический и диффузионный типы горения, а также химическую кинетику горения углеводородных топлив. Данная модель сгорания наиболее хорошо совместима с моделью образования оксидов азота Зельдовича и кинетической моделью образования дисперсных частиц. Для оценки эмиссии NO_x выбрана усовершенствованная модель Зельдовича, учитывающая механизмы образования термических и быстрых NO_x, которая не требует дополнительной настройки и учитывает химическую кинетику образования NO_x. Остальные модели являются полуэмпирическими и поэтому малопригодны для оптимизационного исследования. Для описания образования взвешенных частиц (ВЧ) выбрана кинетическая модель, которая учитывает кинетику горения и образования частиц. Выбранная комбинация моделей сгорания и образования токсичных компонентов отработавших газов является наиболее универсальной и подходящей для оптимизационного исследования параметров топливоподачи.

Математические модели, описывающие процессы дробления факела топлива, нагрева и испарения капель топлива, являются полуэмпирическими. Выбирая данные модели, необходимо добиваться хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных. Для описания процесса дробления топливного факела выбрана модель, концепция которой основана на распаде струи топлива за счет волновых процессов, возникающих в распылителе форсунки. Данный выбор обусловлен простотой применения и высокой точностью описания процесса. Модель нагрева и испарения капель топлива Фролова выбрана исходя из более точного описания процесса, так как учитывает переходные процессы теплообмена между газом и каплей топлива, неравномерность распределения температуры внутри капли топлива, деформацию капли топлива, а также теплообмен внутри капли топлива.

На начальной стадии модель была валидирована на нефтяном ДТ при частоте вращения 1450 мин⁻¹ и режимах нагрузки 25%, 50%, 75% и 100% от номинальной, а также внешней скоростной характеристики (ВСХ), и впоследствии на тех же режимах валидирована на ДБТ. Результаты валидации на ДБТ по нагрузочной характеристике представлены на рисунке 1(а), где приведены основные показатели дизеля. Расхождение расчетных и экспериментальных значений для концентрации NO_x не превышало 7%, для расхода воздуха (G_a), расхода топлива (G_f), удельного эффективного расхода топлива (g_e) и эффективной мощности (N_e) не превышало 5%.

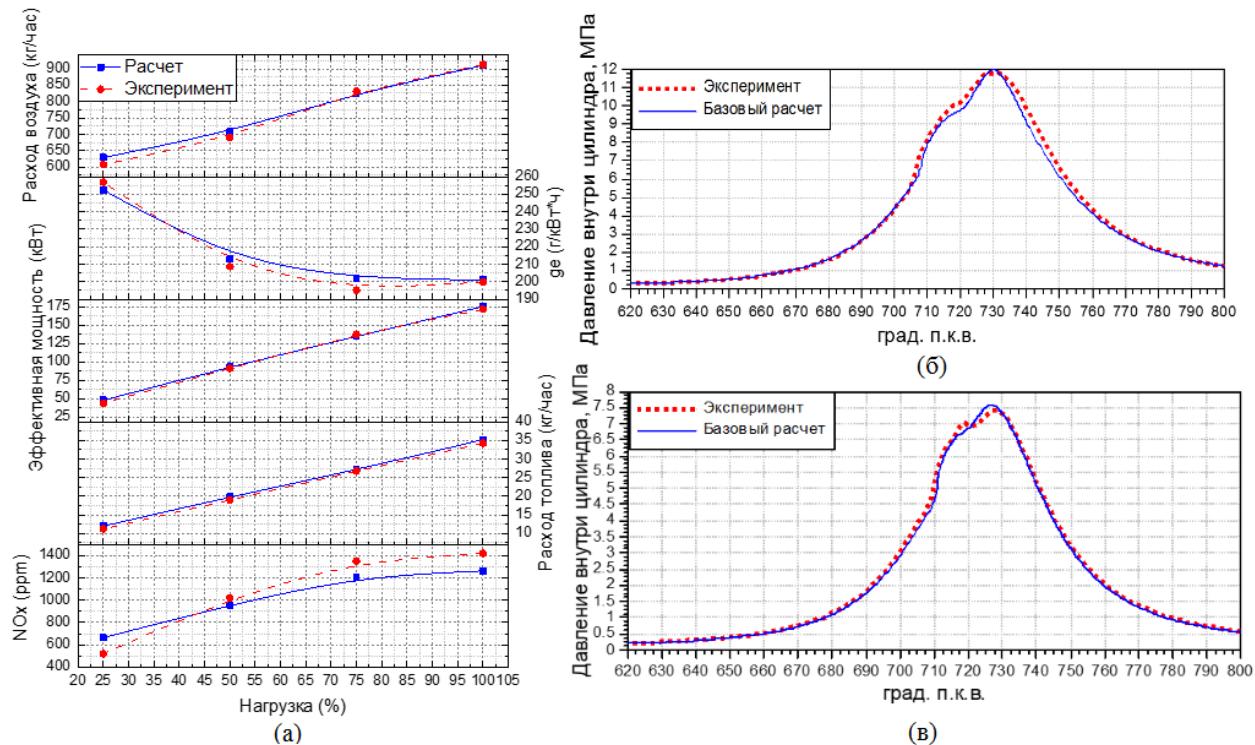


Рисунок 1 – Экспериментальные и расчетные показатели дизеля ЯМЗ-6566 при частоте вращения 1450 мин⁻¹, работающего на ДБТ: (а) – основные показатели дизеля по нагрузочной характеристике; (б) – давление внутри цилиндра при нагрузке 100% от номинальной; (в) – давление внутри цилиндра при нагрузке 25% от номинальной

На рисунках 1(б) и 1(в) представлены экспериментальные и расчетные индикаторные диаграммы для нагрузочных режимов 100% и 25% от номинального

соответственно, где также видна удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчётных данных, разница площадей под расчетными и экспериментальными индикаторными диаграммами (что эквивалентно индикаторной работе цикла) не превышает 3%. Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными, приведенные на рисунке 1, свидетельствуют об удовлетворительной сходимости, следовательно, созданная компьютерная модель адекватно описывает рабочий процесс и пригодна для проведения расчетного оптимизационного исследования.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований с целью оценки технико-экономических и экологических показателей дизеля, работающего на нефтяном ДТ и ДБТ. Также определены регулировочные характеристики при работе на ДБТ и оптимальные регулировки топливной аппаратуры.

Программа испытаний состояла из исследования дизеля ярославского моторного завода модели ЯМЗ-6566, оборудованного системой топливоподачи аккумуляторного типа с электронным управлением при работе на ДБТ со штатными настройками системы управления топливоподачей и на ДБТ с увеличенной цикловой подачей топлива на 14% по массе на режимах цикла ESC Правил ООН №49 и ВСХ. Определение регулировочных характеристик по: давлению впрыскивания в диапазоне 60...160 МПа; углу опережения впрыскивания топлива (УОВТ) пилотной порции в диапазоне 11,5...24 градусов поворота коленчатого вала (град. п.к.в.) до верхней мертвой точки (ВМТ); УОВТ основной порции в диапазоне 0...13 град. п.к.в. до ВМТ; массе пилотной порции в диапазоне 5...10 мг.

Испытательный стенд, изображенный на рисунке 2, оборудован приборами согласно Правилам ООН №49, №85, №24 и ГОСТ 14846-2020.

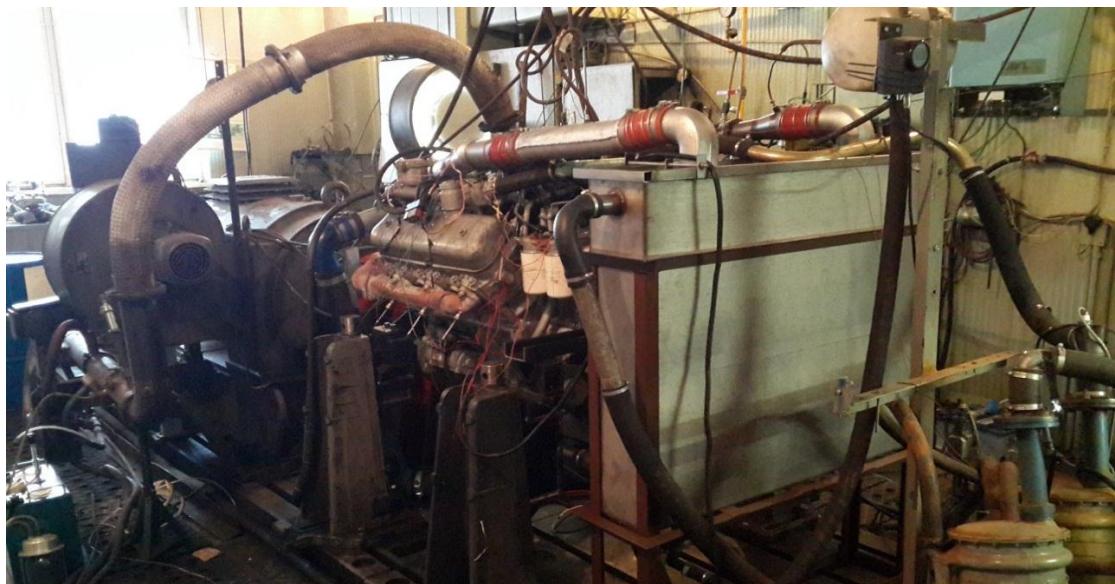


Рисунок 2 – Испытательный стенд

Для более глубокого исследования рабочего процесса использовалась система индицирования, основными измерительными элементами которой являются датчик высокого давления с диапазоном измерения 0...25 МПа, возможностью

кратковременного повышения до 30 МПа, и угловой отметчик, с погрешностью измерений 0,1 град. п.к.в.

В ходе проведенных экспериментальных исследований разработаны следующие рекомендации по адаптации системы питания для работы на ДБТ: в качестве уплотнительных материалов ТНВД должен применяться фторсиликон ФСИ-70М; фильтрующий элемент фильтра тонкой очистки должен быть изготовлен по бесклееевой технологии (допустимо использование бумажных фильтрующих материалов); все детали фильтра-влагоотделителя предварительной очистки топлива должны быть выполнены из полимерных материалов и эластомеров, рекомендуется конструкция с водоотделением, электроподогревом и ручным подкачивающим насосом; топливопроводы низкого давления должны быть выполнены из материалов на основе фторопластов. Рекомендуется использовать штатный блок управления, дооборудованный переключателем режима работы «дизель-биодизель». В режиме «биодизель» должно обеспечиваться переключение на другую калибровочную таблицу, которая обеспечивает корректную работу дизеля на ДБТ.

На рисунке 3 представлены основные технико-экономические и экологические показатели дизеля при работе на режиме внешней скоростной характеристики, где α – коэффициент избытка воздуха, СО – концентрация оксида углерода, СН – концентрация углеводородов, π_k – степень повышения давления в компрессоре, δ_t – степень понижения давления в турбине. При работе дизеля на ДБТ без изменения настроек топливоподачи можно видеть снижение крутящего момента (M_{kp}), увеличение удельного эффективного расхода топлива (g_e), увеличение концентрации NO_x и снижение дымности отработавших газов (К).

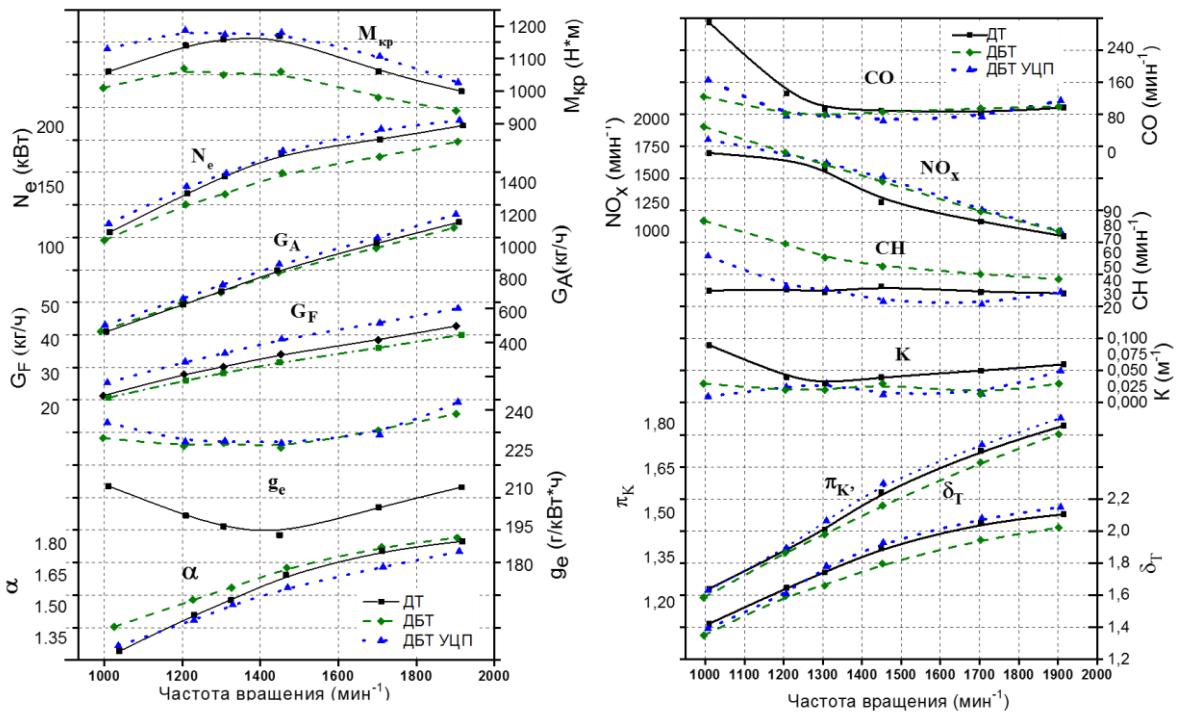


Рисунок 3 – Основные технико-экономические и экологические показатели дизеля при работе на режиме внешней скоростной характеристики на нефтяном ДТ и ДБТ

Увеличение цикловой подачи топлива на 14% по массе позволяет увеличить значение крутящего момента до уровня, достигаемого при работе на нефтяном ДТ, а на некоторых режимах превысить его. Увеличение удельного эффективного расхода топлива и концентрации NO_x , а также снижение дымности происходит примерно до уровня ДБТ без изменения настроек топливоподачи.

На рисунке 4 изображены основные показатели рабочего процесса дизеля на частичных нагрузочных режимах цикла ESC. При работе на ДБТ без изменения настроек топливоподачи заметно снижение мощности, дымности отработавших газов, концентрации NO_x и увеличение удельного эффективного расхода топлива.

Увеличение цикловой подачи позволяет достичнуть значения мощности равной мощности при работе на ДТ, вместе с этим происходит повышение концентрации NO_x по сравнению с нефтяным ДТ. Увеличение удельного эффективного расхода топлива и снижение дымности отработавших газов происходит до уровня ДБТ без изменения настроек топливоподачи.

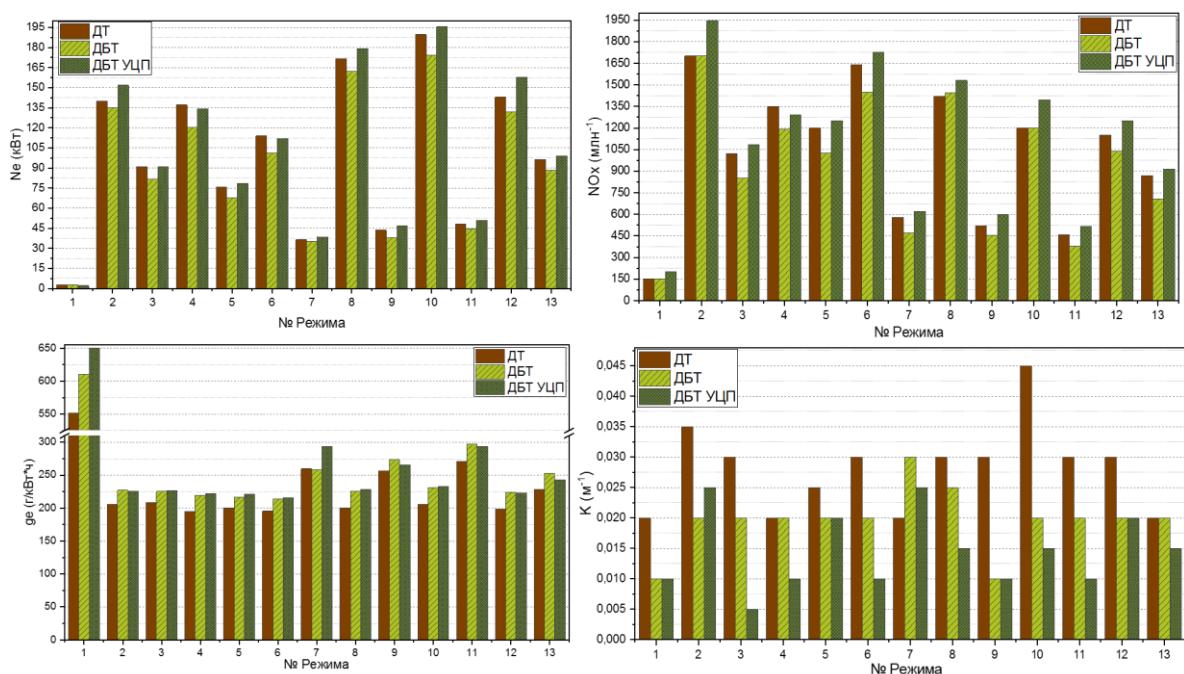


Рисунок 4 – Основные технико-экономические и экологические показатели дизеля при работе на частичных нагрузочных режимах цикла ESC Правил ООН №49

В таблице 2 приведены удельные выбросы оксидов азота и взвешенных частиц в цикле ESC Правил ООН №49

Таблица 2 – Удельные выбросы NO_x и ВЧ в цикле ESC правил ООН №49

| | ДТ | ДБТ | ДБТ УЦП |
|-------------------------|-------|-------|---------|
| NO_x , г/кВт·ч | 11,59 | 11,13 | 13,13 |
| ВЧ*, г/кВт·ч | 0,041 | 0,022 | 0,032 |

*Значение удельных выбросов ВЧ получено путем пересчета из значения дымности

Увеличение цикловой подачи на 14% по массе компенсирует более низкую теплоту сгорания ДБТ, однако повышается концентрация NO_x , что требует применения мероприятий по её снижению.

В 4 главе проведено теоретическое оптимизационное исследование, целью которого являлось определение оптимальных значений параметров многостадийного впрыскивания, позволяющего снизить концентрацию NO_x , удельные выбросы ВЧ при сохранении топливной экономичности дизеля. Необходимо отметить, что экспериментально исследовать параметры 3-х и 4-х стадийного впрыскивания не представлялось возможным ввиду ограниченных возможностей, применяемой на дизеле, системы управления топливоподачей. Для проведения численного исследования выбрано 2 режима работы дизеля: режим 100% и 25% нагрузки от номинальной при частоте вращения 1450 мин^{-1} . Такой выбор обоснован высокими весовыми коэффициентами этих режимов в 13-ти ступенчатом цикле ESC (по Правилам ООН №49).

План теоретического исследования рабочего процесса состоял из определения регулировочных характеристик по: УОВТ первой и второй пилотных порций в диапазоне 70...10 град. п.к.в. до ВМТ с шагом 5 град. п.к.в; массе пилотных порций в диапазоне 3,5...28 мг при условии равенства массы пилотных порций; углу начала поствпрыска в диапазоне 0...40 град. п.к.в. после ВМТ с шагом 5 град. п.к.в; массе порции поствпрыска в диапазоне 3,5...14 мг.

На рисунке 5 приведена регулировочная характеристика по УОВТ пилотных порций при частоте вращения 1450 мин^{-1} и нагрузке 100% от номинальной, где $dP/d\phi$ – жесткость работы дизеля, ВЧ – удельные выбросы взвешенных частиц, приведенные к 1 кг сгоревшего топлива.

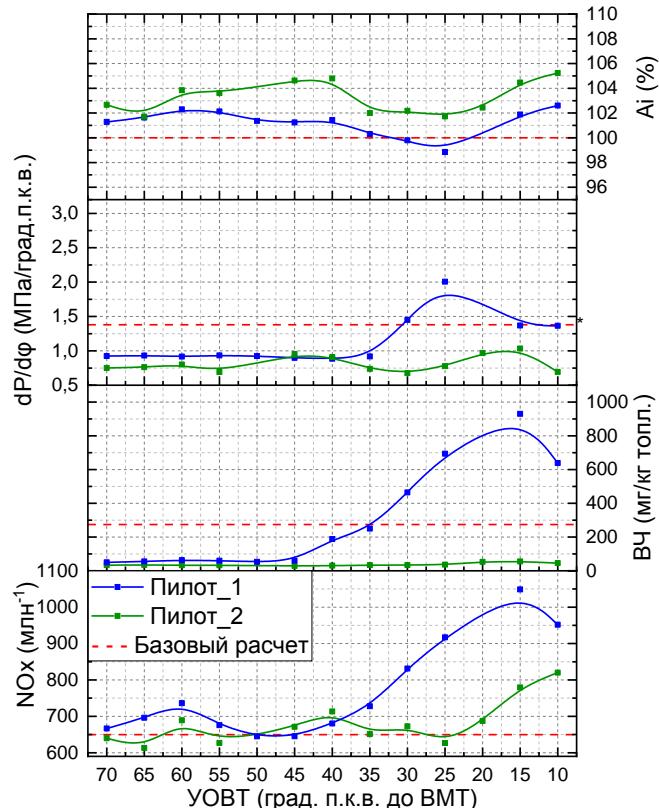


Рисунок 5 – Оптимизация УОВТ пилотных порций при частоте вращений 1450 мин^{-1} и нагрузке 100% от номинальной

Синей линией отображены параметры при оптимизации УОВТ первой пилотной порции при значении УОВТ второй, равном 20,7 град. п.к.в. до ВМТ, зеленой – параметры при оптимизации УОВТ второй пилотной порции при значении УОВТ первой, равном 50 град. п.к.в. до ВМТ. Обеспечение снижения NO_x является непростой задачей, даже при нахождении оптимального значения УОВТ обеих пилотных порций. Существенное влияние на значение индикаторной работы цикла (A_i) оказывает работа сжатия, максимальное значение которой в процессе определения оптимального значения УОВТ первой пилотной порции достигается при 25 град. п.к.в. до ВМТ, второй – при УОВТ равном 45 град. п.к.в. до ВМТ.

При раннем впрыскивании обеих пилотных порций (УОВТ 1-й пилотной порции 50 град. п.к.в. до ВМТ, УОВТ 2-й – 45 град. п.к.в. до ВМТ), несмотря на увеличение работы сжатия на 4,6%, происходит существенное увеличение индикаторной работы цикла на 3,3%, за счет более эффективного процесса сгорания: уменьшение продолжительности сгорания на 8 град. п.к.в., увеличение количества выделившейся теплоты на 4,6% и снижение мольной доли CO на 22,8%. Уменьшение мольной доли CO свидетельствует о более полном сгорании топлива. Сравнение производится со значениями базового расчета, которому соответствует двухфазное впрыскивание, состоящее из одной пилотной порции и одной основной порции, регулировочные параметры которого указаны в таблице 3.

На рисунке 6(а) изображены результаты пошаговой оптимизации (последовательное изменение каждого регулировочного параметра) УОВТ первой пилотной порции для фиксированного значения УОВТ второй, указанного в легенде при нагрузке 25% от номинальной.

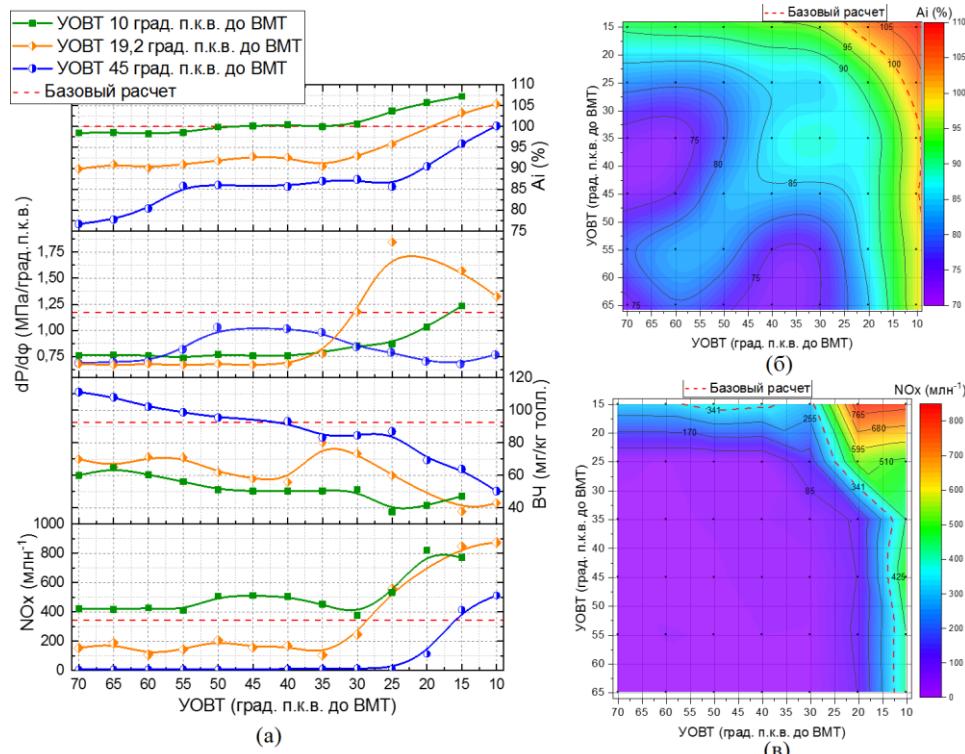


Рисунок 6 – Оптимизация УОВТ пилотных порций при нагрузке 25% от номинальной и частоте вращения 1450 мин⁻¹: (а) – пошаговая оптимизация УОВТ первой пилотной порции; (б) – поле индикаторной работы; (в) – поле концентрации NO_x

Из графика видно, что добавление второй пилотной порции не позволяет снизить концентрацию NO_x при сохранении топливной экономичности. Для того, чтобы представить картину более полно, принято решение произвести оптимизационное исследование методом планирования эксперимента (создание расчетной сетки, для нахождения оптимального значения одного параметра, соответствующего нескольким значениям другого параметра), результаты которого можно видеть на рисунке 6(б), где изображено поле индикаторной работы, а на рисунке 6(в) – поле концентрации NO_x . Из представленных данных видно, что добавление второй пилотной порции при нагрузке 25% от номинальной нецелесообразно из-за невозможности снижения концентрации NO_x при сохранении топливной экономичности.

Оптимизация параметров топливоподачи при нагрузке 100% от номинальной также производилась двумя методами: пошаговым и методом планирования эксперимента. Оба метода показали свою дееспособность, и позволили добиться улучшения рабочего процесса на данном нагрузочном режиме. Различие в значении УОВТ пилотных порций между пошаговым методом оптимизации и методом планирования эксперимента не является противоречием, так как значения близки друг к другу.

Для нагрузочного режима 100% оптимальной стратегией впрыскивания является 4-х фазное впрыскивание топлива, состоящее из двух пилотных порций, одной основной и одной порции поствпрыска. Диаграмму скорости впрыскивания можно видеть на рисунке 7(а).

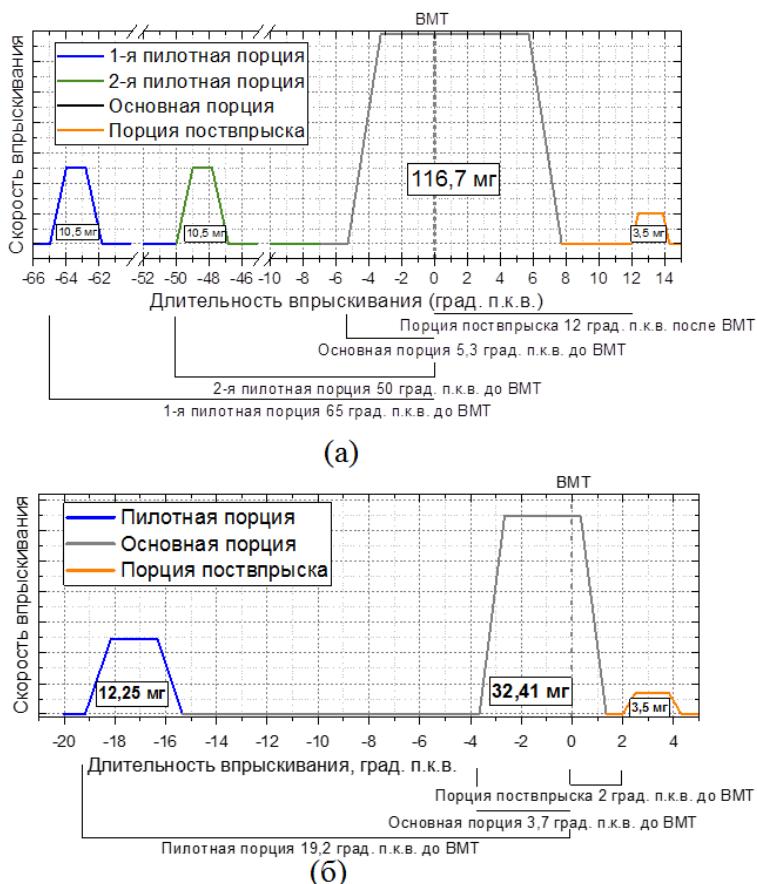


Рисунок 7 – Оптимизированные диаграммы скорости впрыскивания: (а) – нагрузка 100% от номинальной; (б) – нагрузка 25% от номинальной

Результаты оптимизации можно видеть в таблице 3. При помощи пошагового метода оптимизации удалось достичнуть снижения концентрации NO_x на 16%, удельных выбросов ВЧ на 83%, снижения жесткости работы на 35% при сохранении уровня топливной экономичности.

Оптимальной стратегией впрыскивания для нагрузки 25% от номинальной является трехстадийное впрыскивание топлива, состоящее из одной пилотной порции, одной основной и одной порции поствпрыска, параметры топливоподачи показаны на диаграмме, изображенной на рисунке 7(б) и в таблице 3. Удалось достичнуть снижения концентрации NO_x на 10% при сохранении топливной экономичности, снижения жесткости работы на 20%, однако увеличились удельные выбросы ВЧ на 5%. Последнее не является критичным, так как дизельное биотопливо само по себе снижает выбросы ВЧ в диапазоне 30...70% в зависимости от нагрузки.

Таблица 3 – Результаты оптимизации рабочего процесса при частоте вращения 1450 мин⁻¹

| | Оптимальные значения регулировочных параметров ТА | | | | | | | Целевые показатели рабочего процесса | | | |
|--|---|-----|---------------------------|---|---------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------|-------------------|
| | УОВТ пилотной порции, град. п.к.в. до ВМТ | | Масса пилотных порций, мг | УОВГ основной порции, град. п.к.в. до ВМТ | Масса основной порции, мг | Угол начала поствпрыска, град. п.к.в. после ВМТ | Масса порции поствпрыска, мг | $A_i, \%$ | $dP/d\phi, \%$ | ВЧ, % | $\text{NO}_x, \%$ |
| | 1-я | 2-я | | | | | | | | | |
| 100% нагрузки от номинальной | | | | | | | | | | | |
| Базовый расчет | 20,7 | - | 14 | 5,3 | 127,2 | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Оптимальное значение пошаговая оптимизация | 65 | 50 | 10,5 | 5,3 | 116,7 | 10 | 3,5 | 100,5 | 65 | 17 | 84 |
| Оптимальное значение планирование эксперимента | 55 | 50 | 14 | 5,3 | 109,7 | 16 | 7 | 102 | 65 | 18 | 90 |
| 25% нагрузки от номинальной | | | | | | | | | | | |
| Базовый расчет | 19,2 | - | 14 | 3,7 | 48,2 | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Оптимальное значение, пошаговая оптимизация | 19,2 | - | 12,25 | 3,7 | 32,4 | 2 | 3,5 | 100 | 80 | 105 | 90 |

На рисунке 8(а) представлено поле локальных температур при частоте вращения 1450 мин⁻¹ и нагрузке 100% от номинальной для базовых настроек топливоподачи, а на рисунке 8(б) – для оптимизированной стратегии впрыскивания. На рисунке 8(в) представлены графики средней температуры цикла и образования NO_x . Оптимизированная стратегия впрыскивания ДБТ позволяет снизить образование NO_x на всем протяжении процесса горения до момента так называемой «закалки» за счет снижения на 40 К значения средней температуры цикла. Также видно, что значения локальных температур в КС дизеля для оптимизированной стратегии впрыскивания

ниже примерно на 30 К, что позволяет сделать вывод о том, что на данном режиме достигнут процесс горения при пониженных температурах.

Значение средней температуры цикла для оптимизированной стратегии топливоподачи при частоте вращения 1450 мин⁻¹ и нагрузке 25% от номинальной ниже по сравнению с базовым расчетом на 30 К на протяжении всего процесса горения, из чего можно сделать вывод о том, что на данном режиме также достигнут процесс горения топливовоздушной смеси при пониженных температурах.

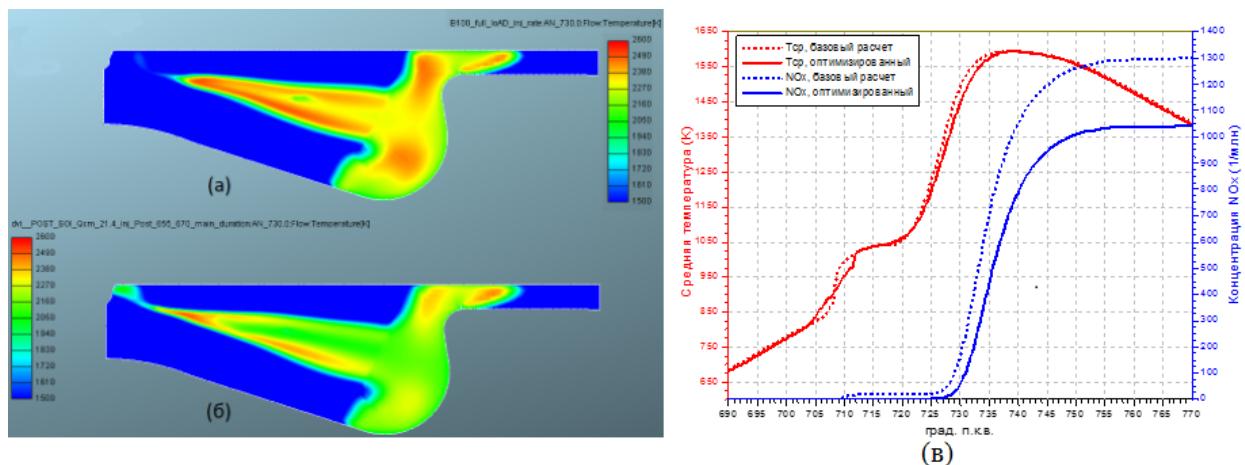


Рисунок 8 – Значения температур в камере сгорания при нагрузке 100% от номинальной и частоте вращения 1450 мин⁻¹: (а) – значения локальных температур в камере сгорания при базовом расчете; (б) – значения локальных температур в камере сгорания при оптимизированном расчете; (в) – значение средних температур и концентрации NO_x

Основные результаты и выводы

1. Предложена методология выбора комбинации математических моделей, описывающих процессы дробления, нагрева и испарения топливного факела, турбулентного перемешивания, сгорания и образования токсичных компонентов отработавших газов при работе на ДБТ, позволяющая создавать компьютерные модели, предназначенные для теоретического исследования рабочего процесса на альтернативных биотопливах.

2. Разработана компьютерная модель рабочего процесса, которая с высокой точностью описывает сгорание дизельного биотоплива и образование вредных веществ - оксидов азота и взвешенных частиц в цилиндре дизеля и может быть применена для выбора оптимальных по уровню топливной экономичности и выбросов вредных веществ параметров многостадийного впрыскивания топлива.

3. Путем проведения расчетных исследований доказано, что за счет оптимизации параметров многостадийного впрыскивания, например 4-х стадийного, с УОВТ первой и второй пилотных порций 65 град. п.к.в. и 50 град. п.к.в. до ВМТ соответственно массой по 10,5 мг каждая, УОВТ основной порции 5,3 град. п.к.в. до ВМТ, массой 116,7 мг и порцией поствпрыска массой 3,5 мг при значении угла начала поствпрыска 12 град. п.к.в. после ВМТ, возможна организация низкотемпературного горения в цилиндре дизеля – снижение средней температуры цикла составило около 40 К, снижение максимального значения локальной температуры – 30 К.

4. На основе анализа расчетных данных доказано, что за счет организации процесса низкотемпературного горения дизельного биотоплива, возможно снижение выбросов токсичных компонентов отработавших газов: NO_x на 16%, ВЧ на 83%, что подтверждает эффективность применения процесса низкотемпературного горения для одновременного снижения выбросов NO_x и ВЧ без ухудшения топливной экономичности.

5. Экспериментально определено, что применение дизельного биотоплива в автомобильном дизеле без изменения настроек топливной аппаратуры позволяет повысить эффективный КПД на 2% на низких частотах до 1200 мин⁻¹, снизить дымность отработавших газов на 30...70%, также снизить концентрацию оксидов азота на 5...12%, однако при этом наблюдается снижение мощности на 11%.

6. На основе анализа экспериментально полученных регулировочных характеристик на ДБТ для двухстадийного впрыскивания, определены параметры топливоподачи для повышения топливной экономичности и снижения выбросов токсичных компонентов отработавших газов: диапазон давления впрыскивания топлива 90...130 МПа; диапазон значений УОВТ основной порции 3...9 град. п.к.в. до ВМТ; значение УОВТ пилотной порции 15 град. п.к.в. до ВМТ; значение массы пилотной порции составило 5 мг при которых снижение удельного эффективного расхода топлива составило около 4%, снижение выбросов NO_x и ВЧ составило около 8% и 30% соответственно.

7. Даны рекомендации по адаптации дизеля для работы на ДБТ, отличительными особенностями системы являются модернизированные для работы на ДБТ топливный насос высокого давления и фильтр предварительной очистки топлива с использованием материалов химически стойких к ДБТ. Корректировке подвергаются параметры топливоподачи, что позволяет достигнуть максимальной степени унификации со штатной системой питания нефтяным дизельным топливом.

8. Результаты, полученные в диссертационной работе, в дальнейшем могут быть использованы для исследования особенностей применения дизельного биотоплива второго поколения. Точность моделирования рабочего процесса дизеля, в том числе процессов образования токсичных веществ, может быть повышена за счет применения механизмов детальной химической кинетики. Более значительное снижение выбросов оксидов азота может быть достигнуто за счет применения системы охлаждаемой рециркуляции отработавших газов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Белов В.П., Зуев Н.С., Пугачёв И.О., Апелинский А.В. Установки для получения метилового эфира из растительного масла. Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 1. № 1 (15). С. 171-179. **Издание входит в перечень ВАК.**
2. Козлов А.В. Анализ преимуществ и проблем применения биодизельного топлива в двигателях с воспламенением от сжатия / А.С. Теренченко, Н.С. Зуев // Труды НАМИ, сб. науч. статей. - М., 2015. - Вып. № 260. - С. 81-98. **Издание входит в перечень ВАК.**
3. Козлов А.В., Теренченко А.С., Зуев Н.С. Экспериментальные исследования показателей дизеля с аккумуляторной системой топливоподачи при работе на биодизельном топливе // Труды НАМИ, сб. науч. статей. - М., 2016. - Вып. № 265. - С. 86-92. **Издание входит в перечень ВАК.**

4. Прах П., Пиош О., Теренченко А.С., Козлов А.В, Зуев Н., Гришин А.Ю., Скрипник А.А. Модель двигателя с непосредственным впрыском, турбонаддувом и электронной системой управления. Труды IX Международной научно-практической конференции «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве» - 27 июня - 1 июля 2016, г.Протвино С.482-486.
5. Теренченко А.С., Козлов А.В., Зуев Н.С. Оптимизация показателей дизеля, работающего на биодизельном топливе // Сб. тезисов докл. междунар. научно-технической конференции «Двигатель-2017», посвященной 110-летию специальности «Поршневые двигатели» в МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С.43-44.
6. Козлов А.В., Зуев Н.С. Влияние параметров топливоподачи биодизельного топлива на технико-экономические и экологические характеристики дизеля // Труды НАМИ. - 2018. - № 1(272). - С. 6-13. **Издание входит в перечень ВАК.**
7. Kozlov A., Terenchenko A., Zuev N., Gattarov I. Experimental Research and Computer Simulation of Knock Onset in a Heavy-Duty Si Gas Engine // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Vol.8. – Iss. 12. - P.730-736. DOI: 10.35940/ijitee.L3072.1081219. **Издание входит в перечень Scopus.**
8. Kozlov A., Terenchenko A., Zuev N., Zelentsov A. CFD Simulation of Knock Onset in a Heavy-Duty Spark Ignition Gas Engine // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2019. – Vol.8. – Iss. 4. - P.9587-9593. DOI:10.35940/ijrte.D9974.118419.
9. Zuev N, Kozlov A, Terenchenko A, Karpukhin, K, Azimov U. Detailed Injection Strategy Analysis of a Heavy-Duty Diesel Engine Running on Rape Methyl Ester // Energies. – 2021. – Vol.14 – 3717. DOI: 10.3390/en14133717. **Издание входит в перечень Scopus.**

Патенты и изобретения

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №208619367, 03.07.2018 г. Программа расчета равновесной концентрации продуктов сгорания природного газа, воспламеняемого запальной порцией дизельного топлива. / Козлов А.В., Теренченко А.С., Лукшо В.А., Зуев Н.С.