На правах рукописи

Much

Лысов Игорь Олегович

# УЛУЧШЕНИЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И СГОРАНИЯ ПУТЕМ СОГЛАСОВАНИЯ ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПРИ ФОРСИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Челябинск – 2020

Работа выполнена на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания и автомобилей» федеральном государственном электронные системы В автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

Научный руководитель –	Камалтдинов Вячеслав Гилимянович,
	доктор технических наук, главный научный
	сотрудник
Официальные оппоненты:	Онищенко Дмитрий Олегович
	доктор технических наук, ФГБОУ ВО
	«Московский государственный технический
	университет им. Н.Э. Баумана (национальный
	исследовательский университет)», профессор
	кафедры Э-2 «Поршневые двигатели», г. Москва
	Гарипов Марат Данилович
	доктор технических наук, ФГБОУ ВО
	«Уфимский государственный авиационный
	технический университет», доцент кафедры
	«Двигатели внутреннего сгорания», г. Уфа
Ведущая организация –	ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
	технический университет им. И.И. Ползунова»,
	г. Барнаул

Защита состоится «29» апреля 2020 г., в 15:30 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, зал диссертационного совета (ауд.1001 гл. корп.).

Тел/факс: +7 (351) 267-91-23. E-mail: D212.298.09@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южноуниверситет Уральский государственный (НИУ)» сайте И на https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/lysov-igor-olegovich.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.298.09.

Автореферат разослан «\_\_\_\_»\_\_\_\_ 20 года.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук, доцент

Абызов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При форсировании дизеля по среднему эффективному давлению ставятся и решаются задачи по повышению топливной экономичности, снижению механической и тепловой нагруженности и улучшению экологических показателей. Решение этих задач определяется степенью совершенства отдельных процессов рабочего цикла, направленные на обеспечение качественного смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля. Это достигается путем совершенствования топливоподающей аппаратуры, согласования формы топливного факела с формой камеры сгорания и организации вихревого движения воздушного заряда. При этом согласование процессов впрыска, смесеобразования И сгорания, по состоянию на сегодняшний день, решается преимущественно экспериментально. Так, конструкция топливной форсунки подвергается например, тщательному анализу на основе исследований процесса визуализации впрыска И распыливания постоянного объема оптической топлива В камере c регистрирующей системой.

Возможность прогнозирования развития и распределения топливного факела в камере сгорания создает предпосылки для улучшения показателей рабочего цикла дизеля и является актуальной.

Основные разделы диссертации выполнены в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» при выполнении ПНИ по лоту шифр 2014-14-579-0109 по теме: «Исследование и разработка технических решений ПО созданию энергоэффективных форсированных дизелей специального назначения для наземных транспортных предоставлении Соглашение субсидии № 14.577.21.0102, машин». 0 уникальный идентификатор RFMEFI57714X0102.

Степень разработанности темы. Вопросами процессов впрыска, смесеобразования и сгорания в дизеле в разные периоды занимались И.В. Астахов, Н.Р. Брилинг, А.Н. Воинов, И.И. Вибе, Л.В. Грехов, Р.Д. Еникеев, Р.З. Кавтарадзе, В.Г. Камалтдинов, А.С. Кулешов, Е.А. Лазарев, А.С. Лышевский, Е.К. Мазинг, Д.О. Онищенко, Н.Ф. Разлейцев, Ю.Б. Свиридов, А.Е. Свистула, F. Anisits, C. Bai, H.A. Currant, V. Golovichev, A. Gosman, H. Hiroyasu, N. Nordin, P.J. O'Rourke, F. Payri, W. Pitz, G. Woschni и другие.

Результаты анализа исследований показывают, что в настоящее время используются три вида моделей процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания. Модели первого вида просты, практичны и описывают процесс тепловыделения заранее заданной функцией в зависимости от времени или угла поворота коленчатого вала. Но в них не учитывается влияние давления, температуры и изменения концентраций реагирующих веществ и инертных компонентов на процесс сгорания. Модели второго вида основаны на применении общего закона химической кинетики, описывают процесс сгорания в общем виде и учитывают основные физические параметры (температура, концентрации топлива и кислорода, энергия активации и другие). Однако эти модели не учитывают наличие в горючей смеси инертных компонентов (азота, продуктов сгорания и другие), которые оказывают флегматизирующее влияние на процесс сгорания в двигателе внутреннего сгорания. Модели третьего вида описывают процесс сгорания топлива как последовательность промежуточных химических реакций, количество которых принимается от нескольких десятков до тысяч в зависимости от принятого механизма окисления топлива. При этом для каждой реакции определяется константа скорости, энергия активации и концентрация реагирующих веществ. Но для практической реализации в инженерном расчете моделей этого вида требуются большие вычислительные мощности, и продолжительность такого расчёта может достигать сотни часов.

Известные математические модели процесса сгорания топлива В внутреннего сгорания поршневых двигателях не учитывают влияния диссоциации на процесс тепловыделения именно в период максимальной температуры или учитывают в неявном виде. Поэтому сегодня продолжаются новых моделей, описывающих работы ПО созданию реальные внутрицилиндровые процессы в двигателях внутреннего сгорания, для развития теории горения.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка технических решений по обеспечению наилучших индикаторных показателей рабочего цикла за счет качественного смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания с параметрами топливоподачи при форсировании транспортного дизеля.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ известных применяемых решений по повышению качества смесеобразования и сгорания в открытой камере сгорания форсированных транспортных дизелях.

2. Разработать математическую модель процесса смесеобразования при форсировании транспортного дизеля с увеличением цикловой подачи топлива аккумуляторной системой топливоподачи, учитывающую форму камеры сгорания в поршне.

3. Разработать математическую модель процесса сгорания с применением законов химической кинетики для описания реакции окисления молекул топлива в объеме, занимаемом топливными факелами.

4. Экспериментально исследовать динамику и выявить закономерности развития топливных факелов, образующихся аккумуляторной системой топливоподачи с различным количеством и диаметрами распыливающих отверстий, и взаимодействия топливных факелов со стенками камеры сгорания при различных условиях впрыска и среды противодавления.

5. Провести расчетно-экспериментальное исследование и выявить закономерности изменения параметров рабочего цикла транспортного дизеля

при его форсировании с учётом реальной динамики развития топливных факелов, формы камеры сгорания в поршне и закона тепловыделения.

6. Разработать рекомендации по обеспечению равномерного распределения впрыскиваемого топлива и воздушного заряда по всему объёму камеры сгорания при установке форсунки под наклоном к центральной оси цилиндра.

## Научная новизна

1. Разработана математическая модель процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания и увеличенной цикловой подачей топлива аккумуляторной системой топливоподачи, которая представлена в виде систем уравнений и описывает скорость смешения молекул топлива с воздухом, изменение объёма всех топливных факелов и долю, которую они занимают в камере сгорания дизеля. Эта доля, в которой топливо распределено равномерно по объёму, определяется как при условиях свободного развития топливных факелов, так и при развитии факелов в периферийной зоне камеры сгорания.

2. Развита математическая модель процесса сгорания В объёме, факелами, где сгорание рассматривается занимаемом топливными как совокупность последовательных реакций окисления групп активных молекул топлива, протекающих по закону Аррениуса. Условная продолжительность окисления групп активных молекул топлива определяется в зависимости от объема топливных факелов, количества молекул кислорода и инертных компонентов в этом объёме. Теплота, выделяющаяся при окислении каждой группы активных молекул топлива, расходуется на повышение давления в цилиндре и температуры смеси в объёме, занимаемом топливными факелами, а также на процесс диссоциации диоксида углерода.

3. Выявлены закономерности развития топливных факелов при различных условиях впрыска топливной аппаратурой аккумуляторного типа, полученные при экспериментальных исследованиях на уникальной научной установке «Впрыск», состоящие в том, что задержка начала и окончания процесса впрыска составляет 0,3 и 1,0 мс, соответственно, с повышением давления в топливной рампе от 100 до 165 МПа уменьшаются углы конусов топливных факелов на ~15% (от  $20^{\circ}$ – $22^{\circ}$  до  $17,5^{\circ}$ – $18,5^{\circ}$ ), увеличиваются средние скорости развития топливных факелов на ~20% (от 43 до 52 м/с), увеличиваются цикловые подачи топлива на 25–28%.

4. Выявлены закономерности изменения параметров рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16 с учётом реальной динамики развития топливных факелов топливной аппаратурой аккумуляторного типа и закона тепловыделения, состоящие в том, что индикаторные показатели рабочего цикла улучшаются при уменьшении коэффициента коррекции закона впрыска  $\lambda_1$  от 2,5 до 0, увеличении доли топлива в первой половине процесса смешения  $\delta_{cM1}$  от 0,3 до 0,62, увеличении продолжительности смешения паров топлива  $\varphi_{cM}$  от 50 до 90 градусов поворота коленчатого вала (град. ПКВ), увеличении угла конуса топливного факела  $\gamma$  от 18° до 22°, увеличении средней скорости развития топливных факелов  $W_{\phi}$  от 40 до 70 м/с и увеличении угла начала смесеобразования  $\varphi_{H.CM}$  от 10 до 30 град. ПКВ до ВМТ.

## Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана программа расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением от сжатия «Дизель», в которой реализованы математические модели процессов смесеобразования и сгорания. Программа позволяет при форсировании дизеля моделировать процесс смесеобразования в зависимости от параметров аккумуляторной системой топливоподачи для получения эффективного процесса сгорания и рациональных показателей рабочего цикла.

2. Разработана, изготовлена и укомплектована камерой постоянного объема с измерительным оборудованием и скоростной цветной видеосъемкой уникальная научная установка «Впрыск» (http://ckp-rf.ru/), предназначенная для проведения комплексных научных исследований, а также физического моделирования процессов гомогенного и гетерогенного смесеобразования и сгорания углеводородов в газовых средах различного химического состава в широком диапазоне температур и давлений.

3. Разработаны рекомендации по обеспечению равномерного распределения топлива и воздуха по камере сгорания для форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16 при установке форсунки под углом к оси цилиндра, состоящие в том, что предложено сместить периферию камеры сгорания в поршне в сторону более длинных топливных факелов с одновременным углублением камеры, повторяющим форму топливного факела или применить распылитель с различными диаметрами распыливающих отверстий для выравнивания динамики развития всех топливных факелов.

Методология и методы исследования. Расчетно-экспериментальное внутрицилиндровых процессов проводилось исследование дизеля с известных общих законов химической использованием кинетики, термодинамики, теплофизики и теории рабочих процессов в поршневом двигателе внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия. Безмоторные экспериментальные исследования базируются на мировом опыте проведения смесеобразования, исследований процессов впрыска И взаимодействия топливной струи со стенкой в условиях физического моделирования в камере постоянного объема.

**Объект исследования.** Рабочий цикл форсированного транспортного дизеля с аккумуляторной топливной аппаратурой.

**Предмет исследования.** Процессы топливоподачи, объемного и пристеночного смесеобразования и сгорания в форсированном транспортном дизеле с аккумуляторной топливной аппаратурой.

На защиту выносятся следующие результаты:

6

1. Математическая модель процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания, учитывающая реальную динамику развития топливных факелов и форму камеры сгорания;

2. Математическая модель сгорания в форсированном транспортном дизеле с использованием законов химической кинетики применительно к объёму, занимаемому топливными факелами и учитывающая реальную динамику их развития;

3. Закономерности развития топливных факелов при различных условиях впрыска топливной аппаратурой аккумуляторного типа, полученные при экспериментальных исследованиях на уникальной научной установке «Впрыск»;

4. Результаты расчетного исследования и выявленные закономерности изменения параметров рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16 с аккумуляторной топливной аппаратурой с учётом реальной динамики развития топливных факелов, формы камеры сгорания и закона тепловыделения.

Степень достоверности подтверждена верификацией разработанных математических моделей с использованием результатов моторных испытаний, применением аттестованного измерительного оборудования при проведении безмоторных экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на региональных, межрегиональных и международных научно-технических конференциях: Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана 2015-2019 гг., Челябинск: International Conference on Industrial Engineering, ЮУрГУ 2015 г. и 2018 г., Челябинск: ЮУрГУ, 2017 и 2018 гг., Томск: ТПУ 2017 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 в международных публикациях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science, 2 свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и списка литературы. Общий объем 151 с., имеется 92 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 129 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, кратко раскрыто содержание диссертации.

**В первой главе** рассмотрены проблемы и способы улучшения качества смесеобразования в транспортных дизелях при установке топливной форсунки под наклоном к оси камеры сгорания.

Рассмотрены виды расчётных моделей, применяемые в зависимости от сложности решаемых задач исследований, и современные экспериментальные исследования процессов смесеобразования и сгорания на безмоторных

моделирующих установках с камерой постоянного объема и скоростной видеосъёмкой.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены разработанные математические модели закона смешения паров топлива и горения в дизеле.

При построении модели процесса смесеобразования в дизеле приняты следующие допущения: всё поданное на данный момент топливо образует топливные факелы, которые имеют форму конуса, и занимает только часть текущего объёма камеры сгорания и распределяется в нём равномерно.

Подготовка смеси при моделировании рассматривается по количеству топлива и по динамике изменения (изменения объема) топливных факелов за шаг расчета  $\Delta \varphi$ . В первом случае смешение паров топлива происходит в течение периода  $\varphi_{cM}$  и разделяется на два равных участка: в первом участке расчёт ведётся от начала  $\varphi_{h.cM}$  до конца первой половины продолжительности смешения  $\varphi_{h.cM}$ +( $\varphi_{cM}/2$ ); на втором участке – от  $\varphi_{h.cM}$ +( $\varphi_{cM}/2$ ) до конца смешения паров топлива  $\varphi_{h.cM}$ + $\varphi_{cM}$ .

Угол начала  $\varphi_{H.CM}$  и продолжительность смешения паров топлива  $\varphi_{CM}$  определяются по результатам обработки индикаторных диаграмм, полученные в ходе моторных испытаний, и являются исходными данными.

В начале расчёта определяется максимальная скорость смешения паров топлива  $W_{cM}^{\text{max}}$  в зависимости от цикловой подачи топлива  $q_{u}$  и продолжительности смешения  $\varphi_{cM}$  по следующему выражению:

$$W_{cM}^{\max} = \frac{2 \cdot q_{\mu}}{\mu_T \cdot A_0 \cdot \varphi_{cM} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_1}{8} + \frac{\lambda_2}{8}\right)},$$
(1)

где  $q_u$  – цикловая подача топлива;  $\mu_T$  – молярная масса топлива;  $A_0$  – атомная единица массы;  $\varphi_{cm}$  – продолжительность смешения паров топлива;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – коэффициенты коррекции закона впрыска на участках 1 и 2, соответственно.

Коэффициент коррекции закона впрыска  $\lambda_1$  на участке 1 задается в исходных данных в диапазоне от 0,3 до 1,5. Коэффициент  $\lambda_2$  рассчитывается из условия соединения и плавного изменения кривых скорости подачи топлива на границе двух участков по следующему выражению:

$$\lambda_2 = \frac{(4+\lambda_1)\cdot(1-\delta_{cM1})}{\delta_{cM1}} - 4, \qquad (2)$$

где  $\delta_{cMI}$  – доля топлива в первой половине (на участке 1) смешения паров топлива от его начала и задаётся в исходных данных в диапазоне 0,4–0,6.

Далее определяются сумма испарившихся молекул топлива  $Z_{T_{CM}I}$  и скорость смешения топлива  $W_{c_{M}i}$  на первом и втором участках по следующим выражениям:

$$\left\{ Z_{T_{CM1}} = \sum_{\varphi_{i \pi p}=0}^{\varphi_{CM}/2} \frac{W_{CM}^{\max}}{2} \left\{ \left[ 1 - \cos(\varphi_{i \pi p}) \right] + \frac{\lambda_1}{4} \left[ 1 - \cos(2 \cdot \varphi_{i \pi p}) \right] \right\}$$
(3)

$$W_{\rm cMi} = \frac{W_{\rm cM}^{\rm max}}{2} \left\{ \left[ 1 - \cos(\varphi_{i \pi p}) \right] + \frac{\lambda_1}{4} \left[ 1 - \cos(2 \cdot \varphi_{i \pi p}) \right] \right\}$$
(4)

$$Z_{T_{CM2}} = \sum_{\varphi_{i \pi p} = \varphi_{CM}/2}^{\varphi_{CM}} \frac{W_{CM}^{\max}}{2} \left\{ \left[ 1 - \cos(\varphi_{i \pi p}) \right] + \frac{\lambda_2}{4} \left[ 1 - \cos(2 \cdot \varphi_{i \pi p}) \right] \right\}$$
(5)

$$W_{\rm cMi} = \frac{W_{\rm cM}^{\rm max}}{2} \left\{ \left[ 1 - \cos(\varphi_{\rm inp}) \right] + \frac{\lambda_2}{4} \left[ 1 - \cos(2 \cdot \varphi_{\rm inp}) \right] \right\}$$
(6)

Здесь угол  $\varphi_{inp}$ , приведенный к 360 град. ПКВ для расчета по косинусоидальному закону (рисунок 1) определяется по уравнению:

$$\varphi_{i \pi p} = \frac{360}{\varphi_{cM}} \cdot (\varphi_i - \varphi_{H.CM}). \tag{7}$$

Полученные зависимости позволяют задавать закон смешения паров топлива в виде функции нормального распределения. Высота, ширина, углы наклона боковых сторон и радиусы скруглений углов кривой задается параметрами  $\lambda_I$  (рисунок 1),  $\delta_{cmI}$  (рисунок 2).



Рисунок 1 – Скорость смешения паров топлива  $W_{\text{см}i}$  при значениях коэффициента  $\lambda_1$  от 0 до 2,5 и при расчете  $W_{\text{см}i}$  только по функции второго порядка



Затем количество молекул топлива на каждом шаге расчёта суммируется  $Z_T = \sum W_{\text{см}i}$  и далее наиболее активные молекулы из этого количества  $Z_T$  принимают участие в процессе сгорания.

При расчёте изменения объёма топливных факелов  $V_{\phi}$  в течение периода  $\varphi_{cm}$  делится на два участка в зависимости от положения поршня: от начала периода смешения паров топлива  $\varphi_{h.cm}$  до 370 град. ПКВ и при движении поршня вниз от 370 до 540 град. ПКВ.

На первом участке определение объёмов факелов ведется при свободном распыливании топлива до момента контакта с днищем поршня (рисунок 3).

Изменение длины факела  $l_{\phi}$ , объём всех топливных факелов  $V_{\phi.cвo\delta}$  и доля камеры сгорания  $\delta_l$ , занимаемая топливными факелами, на первом участке за шаг расчета определяются по следующим выражениям:

$$\begin{cases} l_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{900} \cdot \left(\frac{3 \cdot (\varphi_i - \varphi_{H.CM} + 1, 0)}{370 - \varphi_{H.CM}}\right)^{0.5} & (8) \\ V_{\phi.c60\overline{0}} = i_{\phi} \cdot l_{\phi}^3 \cdot (\sin 0, 5\gamma)^2 & (9) \\ \delta_1 = \frac{V_{\phi.c60\overline{0}}}{V_{PT}} & (10) \end{cases}$$



Рисунок 3 – Расчетная схема определения объема топливного факела при свободном развитии

Здесь  $W_{\phi}$  – средняя скорость движения вершины топливного факела,  $i_{\phi}$  – количество топливных факелов, равное количеству сопловых отверстий в распылителе,  $\gamma$  – угол конуса распыливания топлива,  $V_{PT}$  – текущий объём рабочего тела.

На втором участке при контакте и взаимодействии топливного факела с днищем поршня (рисунок 4) расчет длины  $l_{\phi}$  и доли камеры сгорания  $\delta_{l}$  определяются следующими выражениями:

$$l_{\phi} = \frac{\delta_{\mu oc.pacn} + s_{\mu a \partial n.3a 3 op} + s}{\cos(0, 5 \cdot \gamma_{pacn})}$$
(11)

$$l_{\phi} = l_{\phi.cpah} - \frac{s_{cpah} - s}{\left(\frac{1}{\tan(90 - \beta)} + \frac{1}{\tan(0, 5 \cdot \gamma_{pacn})}\right) \cdot \sin(0, 5 \cdot \gamma_{pacn})}$$
(12)

$$V_{\phi,sasop} = i_{\phi} \cdot l_{\phi}^3 \cdot (\sin 0.5\gamma)^2 \tag{13}$$

$$\delta_{1} = \frac{V_{\phi.3a3op} + 0.4 \cdot (V_{\phi.cso\delta} - V_{\phi.3a3op})}{V_{PT}}$$
(14)

Здесь  $\delta_{hoc.pacn}$  – углубление или выступание носка распылителя форсунки относительно плоскости головки цилиндра,  $s_{hadn.3a3op}$  – надпоршневой зазор, s – величина перемещения поршня,  $\gamma_{pacn}$  – угол распыливания топливных факелов;  $l_{\phi.cpah}$  – граничное условие, когда факел достигает длины равное диаметру горловины чаши в днище поршня,  $s_{cpah}$  – граничное условие, когда поверхность поршня при движении вверх пересекает траекторию развития свободного факела,  $\beta$  – угол наклона боковой стенки камеры сгорания;  $V_{\phi.3a3op}$  – объём факелов при взаимодействии с поверхностями камеры сгорания.

На каждом шаге расчёта определяется суммарный объём факелов:

$$V_{\phi.cymm} = V_{PT} \cdot \delta_1. \tag{15}$$

При движении поршня после верхней мёртвой точки вниз принимается, что объём топливных факелов увеличивается совместно со всем объёмом рабочего тела в цилиндре, т.е. топливные факелы занимают весь объём цилиндра и пламя распространяется по всему цилиндру.



Рисунок 4 – Расчетная схема определения объема топливного факела при взаимодействии со стенками камеры сгорания

На втором участке расчета доля камеры сгорания  $\delta_2$ , суммарный объем  $V_{\phi.сумм}$  и затем условная длина топливного факела по следующим выражениям:

$$\delta_{2} = \delta_{1} + \sum_{\varphi_{i} = 370}^{540} (1 - \delta_{1}) \cdot 0, 17 \cdot \frac{(\varphi_{i} - \varphi_{H.CM})}{(\varphi_{i} + 540)}$$
(16)

$$\begin{cases} V_{\phi.cymm} = V_{PT} \cdot \delta_2 \tag{17}$$

$$\left| l_{\phi} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\phi}}{i_{\phi} \cdot (\sin 0.5\gamma)^2}} \right|$$
(18)

Здесь объём факелов  $V_{\phi}$  определяется как объем факелов при свободном развитии по выражению (9).

Расчёт процесса сгорания начинается с момента образования топливного факела в процессе впрыска и продолжается в течение конца такта сжатия и всего такта расширения пока в объёме топливных факелов  $V_{\phi}$ , имеются молекулы кислорода  $Z_{02}$  и топлива  $Z_T$ .

Для определения количества активных молекул топлива  $Z_T$ , которые прореагируют за время, равное условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива  $\tau_y$ , применяется уравнение Аррениуса.

При этом определение параметра условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива  $Z_T$  от доли камеры сгорания, занимаемая топливными факелами на первом и втором участках расчета  $\delta_{1,2}$ , проводится по следующему выражению:

$$\tau_{y} = \frac{V_{PT} \cdot \delta_{1,2}}{const \cdot \left[1,001 - \left(Z_{O2}^{\phi} / Z_{PT}^{\phi}\right)^{6}\right]} \cdot \left(Z_{O2}^{\phi}\right)^{q} \cdot (Z_{T})^{p-1},$$
(19)

где  $Z_{O2}^{\phi}$  – количество молекул кислорода в объёме, занимаемом топливными факелами на шаге расчёта;  $Z_{PT}^{\phi}$  – количество молекул рабочего тела (кислорода, азота, продуктов сгорания) в объёме, занимаемом топливными факелами на шаге расчёта; *const* – константа, учитывающая количество

активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; *p*, *q* – показатели степени, при сгорании топлива.

Количество молекул кислорода в объеме топливных факелов определяется по уравнению

$$Z_{O2}^{\phi} = Z_{O2} \cdot \delta_{1,2} - \left(C + \frac{H}{4} - \frac{O}{2}\right) \cdot Z_{i\text{сумм}}.$$
 (20)

Количество молекул рабочего тела в объёме топливных факелов определяется по уравнению

$$Z_{PT}^{\phi} = Z_{O2} \cdot \delta_{1,2} - \left(C + \frac{H}{4} - \frac{O}{2}\right) \cdot Z_{i\text{сумм}} + Z_{N2} \cdot \delta_{1,2} + Z_{CO2} + Z_{CO} + Z_{H2O}.$$
(21)

За шаг расчёта  $\Delta \varphi$  активные молекулы топлива  $Z_T$ , составляющие массу  $\Delta m_{cc}$  полностью окисляются с выделением теплоты  $\Delta Q_{cc}$ , которая расходуется на повышение температуры в объёме топливных факелов и давления рабочего тела, как в объёме топливных факелов, так и в цилиндре в целом.

Доля теплоты сгорания затрачивается на нагрев рабочего тела  $T_{\phi}$  в объёме топливных факелов, который определяется по уравнению:

$$T_{\phi} = \left(Q_{cc} - dQ_{\partial ucc} + \frac{Q_{m.o.}}{4}\right) \cdot \frac{\mu_{PT}}{\delta_{1,2} \cdot \mu_{PT}} \cdot m_{PT} \cdot 1000.$$
(22)

Известно, что в объёме, занимаемом топливными факелами, температура  $T_{\phi}$  достигает 2900–3000 К и сохраняется в начале такта расширения в течение 50–60 град. ПКВ. Следовательно, это является ограничением при выборе исходных параметров, представленной модели смешения паров топлива.

**В третьей главе** приведено описание разработанной безмоторной экспериментальной установки укомплектованной регистрирующей оборудованием для исследования процесса смесеобразования (рисунок 5).

Приведено описание выбора диапазонов режимов впрыска топлива электромагнитной форсункой. Приняты следующие режимы: давление топлива в аккумуляторе – от 100 до 165 МПа, продолжительности электрического импульса управления форсункой – от 0,5 до 3,0 мс; и параметры сжатого воздуха в камере постоянного объёма – плотность 35,5 кг/м<sup>3</sup>, давление 3,0 МПа. Выбранные параметры заведомо перекрывают весь диапазон изменения реальных цикловых подач топлива, включая режимы частичных нагрузок и номинальной мощности. Представлена методика определения динамики изменения длины и угла конуса распыленных топливных струй, а также величин задержек начала и окончания топливоподачи и продолжительности всего процесса впрыска топлива при различных давлениях в аккумуляторе и продолжительности электрического импульса управления форсункой.



Рисунок 5 – Общий вид безмоторной экспериментальной установки для моделирования и исследования процесса смесеобразования: 1 – электронный блок управления; 2 – контроллер-синхронизатор; 3 – персональный компьютер; 4 – осциллограф; 5 – скоростная видеокамера; 6 – камера постоянного объёма со светодиодными светильниками; 7 – стенд для испытаний топливной аппаратуры аккумуляторного типа

Испытаны три дизельные электромагнитные форсунки с 8 распыливающими отверстиями диаметрами 0,30 мм и 10 распыливающими отверстиями диаметрами 0,27 и 0,28 мм.

По результатам экспериментальных данных установлено, что впрыскивание топлива начинается с задержкой 0,3 мс от момента начала подачи электрического импульса управления форсункой, а заканчивается с задержкой 1,0 мс от окончания подачи импульса. Скорость движения головной части топливных факелов с момента начала впрыска до касания стенки камеры уменьшается в 3,14 раза (от 90–130 до 30–40 м/с). С увеличением давления в аккумуляторе от 100 до 165 МПа время достижения при свободном развитии топливными факелами длины до 75 мм сокращается примерно в 1,4 раза. При этом углы конусов распыленных топливных струй уменьшаются в среднем на 15% (с  $19^\circ$ – $22^\circ$  до  $17^\circ$ – $18,5^\circ$ ).

При различных значениях давления среды установлено, что по мере увеличения давления от 0,1 до 3,0 МПа в камере постоянного объема, средняя длина топливных факелов уменьшается в различные моменты времени от начала впрыска в 1,1–3 раза. При этом средний угол основного конуса топливных факелов увеличивается с 12°–14° до 20°–22°.

По результатам измерения цикловой подачи установлено, что при увеличении давления в аккумуляторе от 100 до 165 МПа цикловая подача увеличивается на 25–28% при продолжительностях электрического импульса управления форсункой от 1,0 до 3,0 мс. При продолжительности электрического импульса управления форсункой 3,0 мс наибольшая цикловая подача 0,867 мл получена у форсунки с 10 распыливающими отверстиями диаметрами 0,28 мм, наименьшая цикловая подача 0,783 мл получена у

форсунки с 10 распыливающими отверстиями диаметрами 0,27 мм. При увеличении давления в топливном аккумуляторе от 100 до 130 МПа и продолжительности электрического импульса от 0,5 до 1,5 мс цикловая подача возрастает заметно больше, чем при дальнейшем увеличении от 1,5 до 3,0 мс. При давлениях в топливном аккумуляторе от 130 до 165 МПа цикловая подача возрастает практически линейно в диапазоне продолжительности электрического импульса от 1,0 до 3,0 мс.

Исследовано влияние профиля открытой камеры сгорания на формирование топливных факелов в камере постоянного объема. Для этого в камере постоянного объёма были смонтированы ограничивающие шторки, которые позволяют спрофилировать форму камеры сгорания дизеля и фиксировать один из восьми топливных факелов в плоскости. На основе результатов построены взаимные положения топливного факела и профиля днища поршня в процессе впрыска. Установлено, что для форсунки с несимметричным расположением распыливающих отверстий топливные факелы развиваются неодинаково.

На основе последнего результата испытана форсунка с двумя распылителями, которые имеют одинаковое количество распыливающих отверстий равное 8. Но в распылителе №1 отверстия с одинаковыми диаметрами 0,30 мм, а в распылителе №2 – 4 отверстия с диаметрами 0,30 мм и 4 отверстия с увеличенными диаметрами до ~0,50 мм (рисунок 6).



Рисунок 6 – Фотографии распылителя №1 (слева) и распылителя №2 (справа)

Установлено, что для распылителя №1 наибольшую длину имеют топливные факелы из отверстий, оси которых отклонены от оси распылителя на угол около 30° (рисунок 7). Наименьшую длину имеют топливные факелы из отверстий, оси которых отклонены от оси распылителя на угол около 100° (отверстии 1 и 8 на рисунке 6). При этом разница длин факелов достигает 10–15 мм (рисунок 8). Для распылителя №2 (см. рисунок 7) топливные факелы развиваются более равномерно, и разница длин топливных факелов составляет не более 3–5 мм.

Средняя скорость развития топливных факелов у распылителя №2 при давлении топлива в аккумуляторе 100 МПа меньше на 10%, чем у распылителя №1 (рисунок 9). При повышении давления до 165 МПа скорости выравниваются и составляют около 40 м/с.

С увеличением давления топлива в аккумуляторе от 100 до 165 МПа углы конусов топливных факелов у распылителя №1 уменьшаются в среднем на 13,6%, а углы конусов топливных факелов у распылителя №2 уменьшаются в среднем на 5,7%. При увеличении давления в аккумуляторе от 100 до 165 МПа

объёмная цикловая подача топлива с использованием распылителя №1 увеличивается на 31%, с использованием распылителя №2 – на 38,4%.



Рисунок 7 – Развитие топливных факелов в камере постоянного объема с момента начала подачи электрического импульса управления форсункой с распылителями №1 (слева) и №2 (справа) при давлении топлива в аккумуляторе 100 и 165 МПа



Рисунок 8 – Динамика изменения длины топливных факелов под номерами 1, 8 и 4, 5 у распылителя №1 (слева) и распылителя №2 (справа) при давлении в топливной рампе 165 МПа

В четвертой главе представлены результаты расчетного исследования по разработанной программе «Дизель» с определением закономерностей влияния параметров, используемых при моделировании процесса смесеобразования, на показатели процесса сгорания и рабочего цикла при форсировании дизеля типа ЧН15/16 с учётом динамики развития топливных факелов топливной аппаратурой аккумуляторного типа.



Рисунок 9 – Динамика изменения средних длин топливных факелов у распылителей при давлении в аккумуляторе 100 МПа (кривые синего цвета), 130 МПа (кривые зеленого цвета) и 165 МПа (кривые красного цвета)

Результаты исследований влияния динамики изменения испарившегося топлива в объёме, занимаемые топливными факелами, на процесс сгорания и показатели рабочего цикла дизеля представлено на рисунке 10.



Рисунок 10 – Изменение индикаторных показателей рабочего цикла и максимальных давлений и температур в цилиндре в зависимости от коэффициента коррекции закона впрыска  $\lambda_1$ , доли топлива в первой половине процесса смешения  $\delta_{cm1}$  и продолжительности смешения паров топлива  $\varphi_{cm}$ 

Установлено, что при увеличении коэффициента коррекции закона впрыска  $\lambda_1$  до 2,5 все индикаторные показатели рабочего цикла постепенно ухудшаются на ~5,8%, максимальное давление в цилиндре возрастает от 14,75 МПа на ~5,3%, а максимальная температура цикла снижается от 1768 К на 86° (~4,9%). При коэффициенте  $\lambda_1 = 2,5$  основное сгорание топлива происходит в течение 50 град. ПКВ.

С увеличением доли топлива в первой половине процесса смешения  $\delta_{cml}$  от 0,3 до 0,62 индикаторные показатели рабочего цикла улучшаются на ~5,7%, максимальное давление в цилиндре возрастает от 12,63 МПа на ~20,5%, а максимальная температура цикла увеличивается от 1680 К на 57° (~3,4%). При  $\delta_{cml} = 0,62$  основное сгорание топлива происходит в течение 40 град. ПКВ.

С увеличением продолжительности смешения паров топлива  $\varphi_{cm}$  от 50 до 90 град. ПКВ индикаторные показатели улучшаются на ~32%, максимальная температура сначала увеличивается на 115° до 1752 К, а затем снижается, при дальнейшем увеличении до 110 град. ПКВ индикаторные показатели ухудшаются на ~2,1%. При  $\phi_{cM} = 50$  град. ПКВ ухудшение индикаторных показателей происходит из-за большой потери энергии на диссоциацию диоксида углерода при степени диссоциации 0,8, максимальное давление в цилиндре снижается от 16,55 МПа на ~19%.

Результаты исследований влияния закона изменения размеров и объёма топливных факелов на процесс сгорания и показатели рабочего цикла дизеля представлено на рисунке 11.



смесеобразования  $\varphi_{\scriptscriptstyle H.CM}$ 

Установлено, что при уменьшении угла конуса топливных факелов  $\gamma$  от 22° до 18° индикаторные показатели рабочего цикла ухудшаются на ~10,9%, максимальное давление в цилиндре снижается от 14,84 МПа на ~2,6%, а максимальная температура цикла снижается от 1793 К на 146° (~8,1%) из-за увеличения степени диссоциации диоксида углерода от 0,160 до 0,377.

С увеличением средней скорости движения вершины топливного факела  $W_{\phi}$  от 40 до 70 м/с индикаторные показатели рабочего цикла улучшаются на ~34,2%, максимальное давление в цилиндре возрастает от 14,25 МПа на ~6,9%, а максимальная температура цикла повышается от 1528 К на 353° (~23,1%) изза уменьшения степени диссоциации диоксида углерода от 0,55 до 0,03.

С увеличением угла начала смесеобразования  $\varphi_{h.cm}$  от 330 до 350 град. ПКВ (или при уменьшении угла  $\varphi_{h.cm}$  от 30 до 10 град. ПКВ до ВМТ) все индикаторные показатели рабочего цикла ухудшаются на ~19,9%, максимальное давление в цилиндре снижается от 15,10 МПа на ~45,5%, а максимальная температура цикла снижается от 1728 К на 205° (~13,5%).

На основании результатов экспериментальных исследований процесса смесеобразования при различных условиях впрыска, расчетных исследований влияния различных параметров смесеобразования на процесс сгорания и показатели рабочего цикла дизеля типа ЧН15/16 и с учетом разницы подачи топлива между соплами одного распылителя, были рассмотрены два варианта

технических решений по улучшению индикаторных показателей рабочего цикла.

Первое техническое решение заключается в смещении периферии камеры сгорания в поршне в сторону более длинных топливных факелов с одновременным углублением камеры, повторяющим форму топливного факела.

Но из-за сложности изготовления поршня с такой камерой сгорания и неопределенности изменения траектории и амплитуды колебательного движения в цилиндре поршня со смещенным центром тяжести возможность практической реализации этого технического решения в современных условиях ставится под сомнение.

Второе техническое решение заключается в применении распылителя с различными диаметрами распыливающих отверстий для выравнивания развития всех топливных факелов, которое динамики подтверждено За счет этого можно экспериментальными исследованиями. обеспечить равномерное распределение впрыскиваемого топлива и воздушного заряда по всему объему камеры сгорания при установке форсунки под наклоном к центральной оси цилиндра.

Для обоснования целесообразности применения второго технического решения выполнены расчетные исследования рабочего цикла форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16 при четырёх различных вариантах процесса смесеобразования. вариант предполагает Первый применение распылителя, в котором топливные факелы имеют наименьшую длину. При этом начало смесеобразования принималась позже на 1,5-2,0 град. ПКВ (при частоте вращения коленчатого вала 2100 мин<sup>-1</sup>), а цикловая подача топлива – меньше на 10% от номинального значения. Второй вариант предполагает применение распылителя, в котором топливные факелы имеют наибольшую длину. При этом начало смесеобразования принималась раньше на 1,5–2,0 град. ПКВ, а цикловая подача топлива – больше на 10% от номинального значения. Третий вариант предполагает применение распылителя, в котором 4 топливных факела имеют наибольшую длину и 4 топливных факела имеют наименьшую длину. Четвертый вариант предполагает применение распылителя, в котором топливные факелы имеют среднюю длину.

Выполнены расчеты для первых двух и четвёртого вариантов процесса смесеобразования с развитием топливных факелов наименьших, наибольших и средних длин, соответственно. Результаты расчёта рабочего цикла по третьему варианту получены как полусумма индикаторных показателей и других параметров, полученных при расчетах рабочего цикла для вариантов №1 и №2. Результаты расчетов представлены на рисунках 12–14.

Среднее индикаторное давление  $P_i$ , индикаторная работа  $L_i$  и индикаторная мощность  $N_i$  по варианту №4 процесса смесеобразования больше, чем по варианту №3 на ~1,36–1,5%. А индикаторный КПД  $\eta_i$  и удельный индикаторный расход топлива  $g_i$  по варианту №4 процесса смесеобразования лучше, чем по варианту №3 на ~1,0–1,23%. Кроме того, при применении

процесса смесеобразования №4 с одинаковыми топливными факелами средней длины может быть получено более равномерное распределение температуры рабочего тела по объему камеры сгорания, что особенно важно при форсировании дизеля.



Рисунок 13 – Изменение индикаторной мощности N<sub>i</sub>, удельного индикаторного расхода топлива g<sub>i</sub> и максимального давления P<sub>макс</sub> в зависимости от варианта процесса смесеобразования (номера вариантов соответствует рисунку 12)

Рисунок 12 – Изменение среднего индикаторного давления  $p_i$ , индикаторного КПД  $\eta_i$ , a также максимальной степени диссоциации  $\alpha_{\partial ucc}$  и доли камеры сгорания  $\delta_{\kappa c}$  в зависимости от варианта процесса смесеобразования: 1 – с факелами наименьших длин, 2 – факелами наибольших длин, 3 – с четырьмя факелами наибольших длин и с наименьших четырьмя факелами длин и 4 – с факелами средних длин



Рисунок 14 – Изменение индикаторной работы  $L_i$ , максимальной температуры в объеме топливных факелов  $T_{\phi}^{Makc}$  и максимальной температуры  $T_{Makc}$  в цилиндре в зависимости от варианта процесса смесеобразования (номера вариантов соответствует рисунку 12)

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа отечественной и зарубежной литературы установлено, что развитие технологий вычислений и скоростной видеосъёмки за последние десятилетия выводит изучение процессов впрыскивания и распыливания топлива, а также процессов смесеобразования и сгорания на безмоторных моделирующих установках на новый уровень. Поэтому при форсировании дизеля целесообразно проводить экспериментальные исследования топливоподающей аппаратуры на безмоторных установках, оснащенных камерой постоянного объема с оптическими окнами и скоростной видеосъёмкой, которые совместно с расчётно-теоретическими исследованиями позволят ускорить отработку процессов смесеобразования и сгорания и повысить их эффективность.

2. Разработана математическая модель процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания и увеличенной цикловой подачей топлива аккумуляторной системой топливоподачи, которая представлена в виде систем уравнений и описывает скорость смешения молекул топлива с воздухом, изменение объёма всех топливных факелов и долю, которую они занимают в камере сгорания дизеля. Эта доля, в которой топливо распределено равномерно по объёму, определяется как при условиях свободного развития топливных факелов, так и при развитии факелов в периферийной зоне камеры сгорания.

3. Развита математическая модель процесса сгорания В объёме, факелами, где сгорание рассматривается занимаемом топливными как совокупность последовательных реакций окисления групп активных молекул топлива, протекающих по закону Аррениуса. Условная продолжительность окисления групп активных молекул топлива определяется в зависимости от объема топливных факелов, количества молекул кислорода и инертных компонентов в этом объёме. Теплота, выделяющаяся при окислении каждой группы активных молекул топлива, расходуется на повышение давления в цилиндре и температуры смеси в объёме, занимаемом топливными факелами, а также на процесс диссоциации диоксида углерода.

4. Разработаны алгоритм и программа расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением от сжатия «Дизель», в которой реализованы математические модели процессов смесеобразования и сгорания. Программа позволяет при форсировании дизеля моделировать процесс смесеобразования в зависимости от параметров аккумуляторной системой топливоподачи для получения эффективного процесса сгорания и рациональных показателей рабочего цикла.

5. Выявлены закономерности развития топливных факелов при различных условиях впрыска топливной аппаратурой аккумуляторного типа, полученные при экспериментальных исследованиях на уникальной научной установке «Впрыск», состоящие в том, что задержка начала и окончания процесса впрыска составляет 0,3 и 1,0 мс, соответственно, с повышением давления в топливной рампе от 100 до 165 МПа уменьшаются углы конусов топливных факелов на ~15% (от  $20^{\circ}$ – $22^{\circ}$  до  $17,5^{\circ}$ – $18,5^{\circ}$ ), увеличиваются средние скорости развития топливных факелов на ~20% (от 43 до 52 м/с), увеличиваются цикловые подачи топлива на 25–28%.

6. Выявлены закономерности изменения параметров рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16 с учётом реальной динамики развития топливных факелов топливной аппаратурой аккумуляторного типа и закона тепловыделения, состоящие в том, что индикаторные показатели рабочего цикла улучшаются при уменьшении коэффициента коррекции закона впрыска  $\lambda_1$  от 2,5 до 0, увеличении доли топлива в первой половине процесса смешения  $\delta_{cm1}$  от 0,3 до 0,62, увеличении продолжительности смешения паров топлива  $\varphi_{cM}$  от 50 до 90 град. ПКВ, увеличении угла конуса топливного факела  $\gamma$  от 18° до 22°, увеличении средней скорости развития топливных факелов  $W_{\phi}$  от 40 до 70 м/с и увеличении угла начала смесеобразования  $\varphi_{H,CM}$  от 10 до 30 град. ПКВ до ВМТ.

7. Для получения наилучших индикаторных показателей рабочего цикла форсированного транспортного дизеля с наклонной форсункой предложено два варианта технических решений. Первый вариант предполагает смещение периферии камеры сгорания в поршне в сторону более длинных топливных факелов с одновременным углублением камеры, повторяющим форму топливного факела. Второй вариант заключается в применении распылителя с различными диаметрами распыливающих отверстий для выравнивания динамики развития всех топливных факелов для обеспечения равномерного распределения топлива по всему объему камеры сгорания. Выполнено расчетное обоснование второго варианта технического решения, которое показывает, что применение распылителя с различными диаметрами отверстий обеспечит улучшение индикаторных показателей рабочего цикла на ~1,0-1,5% и более равномерное распределение температуры рабочего тела по объёму камеры сгорания, что особенно важно при форсировании дизеля.

Дальнейшая разработка темы исследования осуществляется в следующих направлениях: совершенствование предложенных математических моделей процессов смесеобразования и сгорания, проведение испытаний на полноразмерном дизеле, оснащенном топливоподающей аппаратурой аккумуляторного типа с опытными распылителями.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лысов, И.О. Особенности регулирования форсированного транспортного дизеля с кривошипно-шатунным механизмом с прицепным шатуном / И.О. Лысов, В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2017. – № 4. – С. 8–12.

2. Камалтдинов, В.Г. Исследование впрыска топлива в системе Common Rail на уникальной научной установке «Впрыск» / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, **И.О. Лысов**, А.Е. Попов, А.Е. Смолий // Известия МГТУ «МАМИ». – 2018. – № 1 (35). – С. 16–23.

3. Камалтдинов, В.Г. Оптимизация рабочего цикла транспортного дизеля моделированием процесса сгорания двойной функцией Вибе / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, **И.О. Лысов**, А.Е. Попов, А.Е. Смолий // Известия МГТУ «МАМИ». – 2018. – № 2 (36). – С. 48–55.

4. Камалтдинов, В.Г. Моделирование процесса сгорания в форсированном транспортном дизеле с заданным законом смесеобразования / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, **И.О. Лысов**, А.Е. Попов, А.Е. Смолий // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. –№ 4. – С. 3–10.

Публикации в изданиях, входящие в БД Scopus и Web of Science:

5. Kamaltdinov, V.G. Modeling the combustion process of a powerful diesel engine / V.G. Kamaltdinov, V.A. Markov, **I.O. Lysov** // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 488–494. DOI:10.1016/j.proeng.2015.12.159 (Conference Paper, Scopus).

6. Kamaltdinov, V.G. Diesel Engine operating cycle optimization with simulation of combustion process by double-Wiebe function / V.G. Kamaltdinov, **I.O. Lysov**, S.S. Nikiforov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 873–878. DOI:10.1016/j.proeng.2015.12.113 (Conference Paper, Scopus, Web of Science).

7. Kamaltdinov, V.G. Experimental Investigations of the Effects of Electric Control Impulse on Injection Characteristics of Common Rail Type Injector / V.G. Kamaltdinov, Y.V. Rozhdestvensky, **I.O. Lysov**, A.Y. Popov, S.S. Nikiforov // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9 (42). – 7 p. DOI:10.17485/ijst/2016/v9i42/104225 (Article, Scopus).

8. Kamaltdinov, V.G. Determining Parameters of Double-Wiebe Function for Simulation of Combustion Process in an Overload Diesel Engine with Common Rail Fuel Feed System / V.G. Kamaltdinov, V.A. Markov, **I.O. Lysov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327 (022053). – 7 p. DOI:10.1088/1757-899X/327/2/022053 (Conference Paper, Scopus).

9. Lysov, I.O. Research of nature of interaction of fuel spray with wall of combustion chamber of overload diesel engine on unique 'injection' research installation / I.O. Lysov, S.S. Nikiforov, E.B. Ryzhuk // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 0 (9783319956299). – P. 311–318. DOI:10.1007/978-3-319-95630-5\_34 (Book Chapter, Scopus).

10. Kamaltdinov, V.G. Experimental studies of fuel injection in a diesel engine with an inclined injector / V.G. Kamaltdinov, V.A. Markov, **I.O. Lysov**, A.A. Zherdev, V.V. Furman // Energies. – 2019. – Vol. 12 (14). – 18 p. DOI:10.3390/en12142643 (Article, Scopus, Web of Science).

## Другие публикации:

11. Камалтдинов, В.Г. Модель рабочего цикла для определения рациональной характеристики выгорания топлива для высокофорсированного дизеля: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, Г.Д. Драгунов, **И.О. Лысов** // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2015. – № 5 (104). – С. 138–139.

12. Камалтдинов, В.Г. Моделирование процесса сгорания в форсированном транспортном дизеле с учётом смесеобразования: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, С.С. Никифоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 5 (110). – С. 107.

13. Камалтдинов, В.Г. Методика экспериментальных исследований процессов впрыска топлива и смесеобразования в камере постоянного объёма: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, **И.О.** 

Лысов, А.Е. Попов, В.И. Дайбов, Д.Р. Бакиев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 5 (110). – С. 107.

14. Камалтдинов, В.Г. Расчётная оптимизация рабочего цикла дизеля с моделированием процесса сгорания двойной функцией Вибе: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, **И.О. Лысов**, В.И. Дайбов, Д.Р. Бакиев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 5 (110). – С. 107–108.

15. Камалтдинов, В.Г. Обработка индикаторной диаграммы форсированного дизеля с системой топливоподачи типа Common Rail: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков, И.О. Лысов, С.С. Никифоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – № 4 (115). – С. 127.

16. Камалтдинов, В.Г. Некоторые результаты экспериментальных исследований процессов подачи топлива и смесеобразования в камере постоянного объема: Тезисы доклада на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Г. Камалтдинов, **И.О. Лысов**, А.Е. Попов, И.С. Сидоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – № 4 (115). – С. 127.

## Интеллектуальная собственность:

17. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета рабочего цикла дизеля «Double-Wiebe function» / В.Г. Камалтдинов, **И.О. Лысов**; заявитель и правообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. - № 2017610304; заявл. 02.11.2016; опубл. 10.01.2017.

18. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета рабочего цикла поршневого двигателя с воспламенением от сжатия «Дизель» / В.Г. Камалтдинов, **И.О.** Лысов; заявитель и правообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. - № 2017619130; заявл. 19.05.2017; опубл. 15.08.2017.