

На правах рукописи

Акимов Виктор Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВПРЫСКИВАНИЯ
И РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЕ
С ГОМОГЕННЫМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕМ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре теплофизики.

Научный руководитель: **Марков Владимир Анатольевич**
доктор технических наук, профессор
кафедры теплофизики ФГБОУ ВПО МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Ерохов Виктор Иванович**
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
кафедры автомобильных и тракторных
двигателей ФГБОУ ВПО «Московский
государственный машиностроительный
университет (МАМИ)»

Савастенко Андрей Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
теплотехники и тепловых двигателей
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов»

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ)»

Защита диссертации состоится 10 декабря 2015 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан 23 октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью удовлетворения современных жестких требований к показателям топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Эти показатели в значительной степени зависят от характера протекания процессов впрыскивания, распыливания топлива и смесеобразования, которые, в свою очередь, определяются конструкцией системы топливоподачи и, в особенности, конструкцией форсунок и их распылителей. Проблема обеспечения требуемых параметров впрыскивания, распыливания топлива и смесеобразования особенно актуальна для ДВС, в которых реализуется сгорание гомогенной топливоздушная смеси – процесс *Homogeneous Charge Compression Ignition* (HCCI-процесс). В этих двигателях необходимо организовать смесеобразование, обеспечивающее равномерное распределение испарившегося топлива по объему цилиндра и наиболее полное сгорание топлива с наибольшей эффективностью рабочего цикла. В связи с этим требуется проведение целого комплекса расчетных и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование процессов впрыскивания, распыливания топлива в двигателях с гомогенным смесеобразованием. При организации HCCI-процесса благодаря гомогенности рабочей смеси, сравнительно высоким значениям коэффициента избытка воздуха и низким значениям локальных температур возможна минимизация выбросов вредных веществ с ОГ.

Цель работы: совершенствование процессов впрыскивания и распыливания топлива в двигателе с гомогенным смесеобразованием.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов. С помощью теоретических методов проведены расчетные исследования параметров впрыскивания, распыливания топлива и смесеобразования, показателей топливной экономичности и токсичности ОГ, влияния геометрии проточной части распылителей форсунок на показатели потока топлива и параметры процесса распыливания топлива. Экспериментальная часть работы заключалась в определении показателей двигателя.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана двухэтапная методика расчета процессов впрыскивания и распыливания топлива, применимая для любой геометрии распылителя;
- реализована методика совместного использования программных комплексов (ПК) *Ansys Fluent*, ВПРЫСК и ДИЗЕЛЬ-РК для моделирования HCCI-процесса при впрыскивании топлива форсункой нетрадиционной геометрии;
- предложена концепция двигателя типа *Z-engine*, представляющего собой двухтактный дизель с клапанным газообменом и процессом сжатия, раз-

деленным на две части – предварительную во внешних агрегатах и финальную в цилиндре двигателя;

- для предотвращения попадания топлива на стенки цилиндра в условиях низкой плотности газов предложена многостадийная стратегия впрыскивания штифтовой форсункой с малым эффективным сечением.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием современных методик расчета параметров рабочего процесса двигателя и показателей процессов впрыскивания, распыливания топлива и смесеобразования;

- совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследований, полученных при испытаниях на двигателе.

Практическая ценность состоит в том, что:

- при проведении расчетных исследований течения топлива в проточной части распылителя форсунки ДВС и продвижения и испарения струй в цилиндре двигателя с использованием ПК *Ansys Fluent* показано влияние кавитации и проникновения воздуха на характеристики потока топлива в распылителях с различной геометрией проточной части;

- с использованием экспериментальных данных проведены выбор и отладка математических моделей впрыскивания, распыливания и испарения топлива для распылителей с нестандартной геометрией проточной части в условиях кавитации;

- исследовано влияние различных факторов на показатели распыливания и испарения топлива, предложены способы ограничения дальности струи и улучшения показателей качества распыливания в условиях низкой плотности газов в цилиндре;

- показана целесообразность реализации *HCCI*-процесса и его разновидности – процесса *Spark Assisted Homogeneous Charge Compression Ignition* (*SA HCCI*-процесс) в двигателе типа *Z-engine* с целью снижения выбросов с отработавшими газами оксидов азота и дымности ОГ;

- результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили работоспособность разработанного двигателя типа *Z-engine* и его эффективность при снижении выбросов с ОГ оксидов азота и их дымности.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ кафедр поршневых двигателей и теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также лаборатории автоматизации НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в ФГОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева и в ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск).

Апробация работы:

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2015 г. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на заседаниях кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2013 г., 2015г.);
- на заседании школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Орехово-Зуево, 2013 г.);
- на международной научно-технической конференции «6-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» при ГТУ «МАДИ» (Москва, 2013 г.);
- на международной научно-технической конференции «7-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе» при ГТУ «МАДИ» (Москва, 2015 г.);
- на Всероссийском научно-техническом семинаре (ВНТС) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2011-2014 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 15 из них опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых ведущих научных журналов и изданий. Общий объем работ – 3 п.л. Также по теме диссертации опубликовано 9 материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 238 страниц, включая 218 страниц основного текста, содержащего 137 рисунков, 15 таблиц. Список литературы включает 181 наименование на 19 страницах. Приложение на 20 страницах включает листинги результатов расчетных исследований, содержание пользовательских функций для осуществления расчетов и документы о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость совершенствования процессов впрыскивания и распыливания топлива в ДВС с гомогенным смесеобразованием и дана общая характеристика диссертации.

В первой главе проведен анализ работ, опубликованных по теме диссертации. Рассмотрены особенности организации процессов впрыскивания и распыливания топлива в дизелях и двигателях с гомогенным смесеобразованием, явления и факторы, влияющие на показатели качества этих процессов, а также методы улучшения этих показателей. Отмечена актуальность улучшения качества указанных процессов в ДВС с гомогенным смесеобразованием. В работах Л.В. Грехова, С.В. Гусакова, Р.З. Кавтарадзе, А.С. Кулешова, В.Г. Камалтдинова, Е.А. Федянова и других ученых показано, что совершенствование процессов впрыскивания и распыливания топлива в дизелях и двигателях с гомогенным смесеобразованием яв-

ляется эффективным методом достижения требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ. На основании проведенного анализа сформулированы цель работы и следующие задачи:

1. Разработка методик расчета процессов впрыскивания, распыливания и испарения топлива для распылителей в условиях кавитации, с использованием которых можно получить характеристики потока, струй топлива и смесеобразования, показатели качества распыливания и испарения для любой геометрии распылителя.

2. Проведение расчетных исследований влияния кавитации на течение топлива в распылителях форсунок и характеристики распыливания топлива и распада струй.

3. Проведение расчетных исследований факторов, влияющих на проникновение струи, интенсивность распада струи и испарения капель в условиях низкой плотности газов в цилиндре.

4. Определение способов ограничения дальности струи и улучшения показателей качества распыливания в условиях низкой плотности газов в цилиндре.

5. Разработка концепции смесеобразования в *НССИ*-двигателе, в рамках которой обеспечивается полное испарение капель и предотвращается попадание топлива на стенки цилиндра.

6. Разработка концепции двигателя типа *Z-engine*, в котором реализуется *НССИ*-процесс с достижением пониженных выбросов с отработавшими газами оксидов азота и дымности ОГ.

7. Проведение сравнительных расчетных исследований рабочего процесса при организации в двигателе традиционного дизельного сгорания и *НССИ*-процесса.

8. Проведение экспериментальных исследований рабочего процесса на одноцилиндровом прототипе двигателя типа *Z-engine*.

9. Сравнительный анализ результатов расчетных исследований рабочего процесса двигателя с полученными экспериментальными данными.

Вторая глава посвящена расчетным исследованиям процессов впрыскивания, распыливания и смесеобразования дизеля и *НССИ*-двигателя. Отмечено, что при организации *НССИ*-процесса обеспечивается сгорание обедненной смеси при сравнительно высоких значениях коэффициента избытка воздуха и низких значениях локальных температур. При этом достигаются минимальные выбросы вредных веществ с ОГ. Рассмотрены проблемы организации гомогенного смесеобразования в цилиндре двигателя и аспекты его численного моделирования. Отмечена недостаточная универсальность существующих подходов для расчета характеристик распыливания и испарения топлива, а также необходимость разработки новых методик расчета. Показано, что истечение топлива из распылителя и дальнейшее формирование струи является сложным физическим явлением, включающим в себя множество эффектов. На Рис. 1

представлена схема этого процесса на примере штифтового распылителя, согласно которой истечение и распыливание топлива может быть условно разделено на два этапа: протекание внутри распылителя и процессы внутри цилиндра. Сложность этих физических процессов предопределяет большой набор эффектов и явлений, которые необходимо учитывать при моделировании (см. Таблицу 1). Необходимость учета конкретных явлений при численном моделировании предопределяет выбор ПК. Рассмотрены ПК для моделирования истечения и распыливания топлива. Проанализирована возможность использования методов вычислительной гидродинамики (*Computational fluid dynamics (CFD)*) и метода конечных объемов при таком моделировании. Для проведения расчетных исследований был выбран ПК *Ansys Fluent*. Проведен выбор математических моделей для описания всех необходимых явлений и эффектов, проведена отладка этих моделей по известным экспериментальным данным. По результатам исследований определен набор наиболее целесообразных моделей для описания различных явлений, связанных с впрыскиванием, распыливанием и испарением топлива в ДВС (Таблица 1). Представлены основные уравнения численного метода и математических моделей.

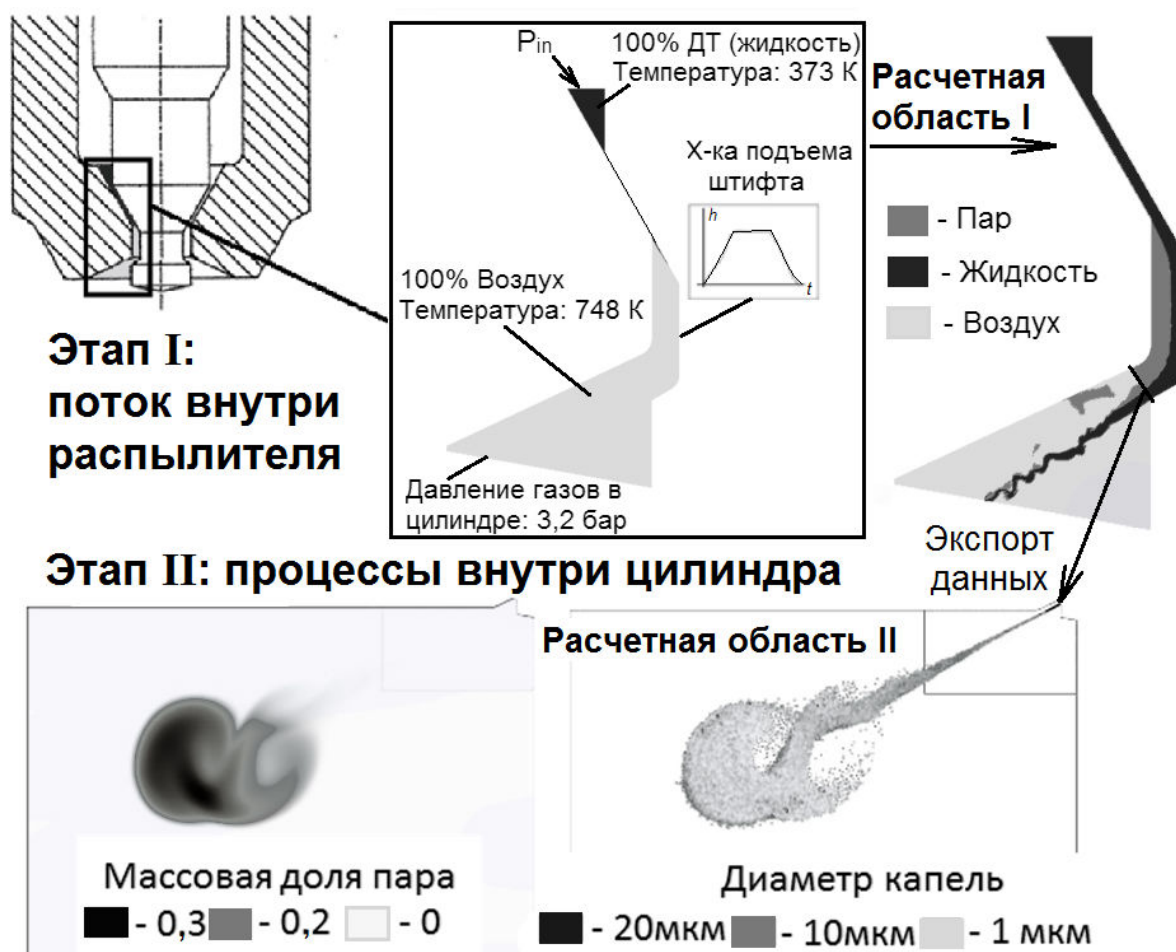


Рис. 1. Схема двухэтапной методики расчета процессов впрыскивания, распыливания и испарения на примере форсунки штифтового типа

Таблица 1.

Явления, характеризующие впрыскивание, распыливание, испарение топлива и целесообразные модели для их описания в рамках CFD-технологий

Этап	I: Поток внутри распылителя			II: Процессы внутри цилиндра				
Зона	Внутренние каналы распылителя		Переходная зона из распылителя в цилиндр	Внутрицилиндрическая зона				
Стадия	Течение во внутренних каналах		Первичный распад	Продвижение струи, вторичный распад, испарение, смесеобразование				
	Явления	Модель в ANSYS Fluent	Явления	Модель в ANSYS Fluent	Явления	Модель в ANSYS Fluent	Явления (продолжение)	Модель в ANSYS Fluent
	Турбулентность	<i>Realizable k-ε</i>	Турбулентность	<i>Detached eddy simulation (LES + Realizable k-ε)</i>	Турбулентность	<i>Realizable k-ε</i> или <i>Reynolds stress model</i>	Теплообмен между каплями и газом	<i>Ranz-Marshall</i>
	Пристеночное течение	<i>Scalable wall function</i>	Пристеночное течение	<i>Enhanced wall treatment</i>	Пристеночное течение	<i>Scalable wall function</i>	Массообмен	<i>Species transport model</i>
	Кавитация	<i>Schnerr-Sauer cavitation model</i>	Кавитация	<i>Schnerr-Sauer cavitation model</i>	Движение дисперсной среды каплей	<i>Discrete phase model</i>	Испарение	<i>Convection / Diffusion controlled</i>
	Сжимаемость топлива	<i>Tait equation</i>	Сжимаемость топлива	<i>Tait equation</i>	Аэродинамическое взаимодействие	<i>Dynamic drag model</i>	Турбулентная дисперсия каплей	<i>Stochastic tracking</i>
	Многофазность, проникновение воздуха	<i>Volume of fluid model</i>	Многофазность, проникновение воздуха	<i>Volume of fluid model</i>	Вторичный распад каплей	<i>Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor model</i>		
	Поверхностное натяжение	<i>Continuum surface force</i>	Поверхностное натяжение	<i>Continuum surface force</i>	Столкновение / Слияние каплей	<i>Collision / Coalescence model</i> или не моделируется		
	Подвижность штифта	<i>Dynamic mesh (Smoothing / Remeshing)</i>	Подвижность штифта	<i>Dynamic mesh (Smoothing / Remeshing)</i>	Подвижность поршня	<i>Dynamic mesh (Layering)</i>		

При расчетах течения во внутренних каналах распылителя и учета явлений, связанных с достижением потоком топлива скорости звука в многофазной среде, учитывалась сжимаемость топлива. С использовани-

ем ПК *Ansys Fluent* проведены численные исследования течений во внутренних каналах распылителей с различной геометрией, а также формирования и продвижения, распада и испарения струй внутри цилиндра. Предложена методика расчета, состоящая в разделении процесса впрыскивания на два этапа: на первом этапе моделируется течение топлива в каналах распылителя форсунки, на втором – развитие струй топлива и испарение капель внутри цилиндра. Реализация данной методики на примере форсунки штифтового типа приведена на Рис. 1. Эту методику можно использовать для расчета распылителей любой геометрии. В рамках методики, для перехода от толщины струи на выходе из распылителя к размерам начальных капель могут быть использованы эмпирические зависимости, экспериментальные данные или прямое моделирование первичного распада струи. Проведен поиск методов ограничения дальности струи и улучшения показателей качества распыливания топлива в условиях низкой плотности газов в цилиндре. Предложена многостадийная стратегия впрыскивания штифтовой форсункой с малым эффективным сечением. Рассмотрены проблемы моделирования первичного распада струи.

В третьей главе представлены результаты расчетных исследований показателей рабочего процесса дизеля и *НССИ*-двигателя. Обоснована необходимость разработки и внедрения новых типов ДВС. Описан альтернативный ДВС – двигатель типа *Z-engine*, предложенный компанией *Aumet Oy* (Финляндия). Схема принципа работы двигателя представлена на Рис. 2. В этом двухтактном двигателе с клапанным газообменом впуск воздуха происходит очень интенсивно благодаря принципиально новому механизму газораспределения и значительному сжатию перед впуском в цилиндр с помощью поршневого компрессора. Выпуск происходит почти так же, как и в обычном четырехтактном двигателе.

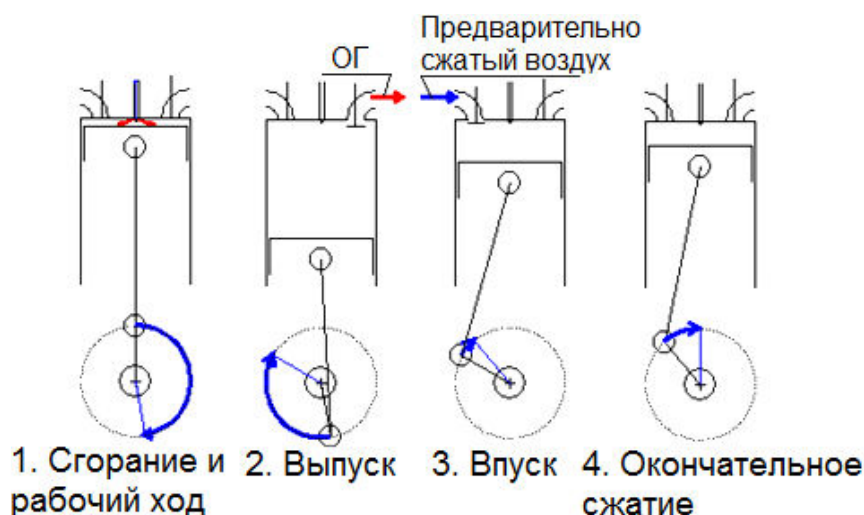


Рис. 2. Схема принципа работы двигателя типа *Z-engine*

Рассмотрены ПК для моделирования рабочего процесса ДВС. Для проведения расчетных исследований выбран ПК ДИЗЕЛЬ-РК, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором А.С. Кулешовым. Изло-

жена математическая модель указанного программного комплекса, обозначены существенные отличия в моделировании рабочего процесса дизеля и *HCCI*-двигателя. На первом этапе исследований с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК проведено моделирование рабочего процесса двухцилиндрового двигателя типа *Z-engine* размерности $D/S = 72/70$ с традиционным дизельным сгоранием, а также его сравнение с рабочим процессом аналогичного (по размерности) четырехцилиндрового четырехтактного дизеля типа 4 ЧН 7,2/7,0 с системой рециркуляции ОГ (*Exhaust Gas Recirculation (EGR)*). В Таблице 2 приведены основные характеристики исследуемых ДВС, в Таблице 3 – характеристики и показатели двигателя типа *Z-engine* на режиме максимального крутящего момента. Полученные в результате исследований нагрузочные характеристики (Рис. 3) свидетельствуют о том, что высокий уровень «внутренней» рециркуляции ОГ и низкая температура в зоне сгорания $T_{сгор}$ в двигателе типа *Z-engine* способствуют значительному снижению выбросов оксидов азота NO_x .

Таблица 2.

Основные характеристики исследуемых двигателей

Характеристики	Дизель 4 ЧН 7,2/7,0	Двигатель типа <i>Z-engine</i>
Диаметр цилиндра, мм	72	72
Ход поршня, мм	70	70
Степень сжатия	16,5	15,5
Наддув	Турбокомпрессор (ТК)	ТК + поршневой компрессор
Среднее эффективное давление на режиме максимального крутящего момента	26,5 бар при частоте вращения коленчатого вала (КВ) $n=1500 \text{ мин}^{-1}$	26,2 бар при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$

Таблица 3.

Показатели исследуемого двигателя типа *Z-engine* на режиме максимального крутящего момента

Показатели	Значения
Среднее эффективное давление p_e	26,2 бар при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$
Цикловая подача	53 мг
Степень повышения давления в ТК / КПД	4,3 / 0,47
Степень повышения давления в поршневом компрессоре / КПД	4,25 / 0,85
Доля остаточных газов (EGR)	0,163
Максимальное давление в цилиндре p_z	202 бар
Распылитель	$8 \times 0,131 \text{ мм}$
Топливоподача	2 стадии: 15% и 85%
Угол опережения впрыскивания топлива (УОВТ)	0 градусов поворота коленчатого вала (п.к.в.) до верхней мертвой точки (ВМТ)
Максимальное давление впрыскивания	1400 бар
Удельный эффективный расход топлива	255 г/(кВт·ч)
Удельный выброс оксидов азота (NO_x)	1,1 г/(кВт·ч)

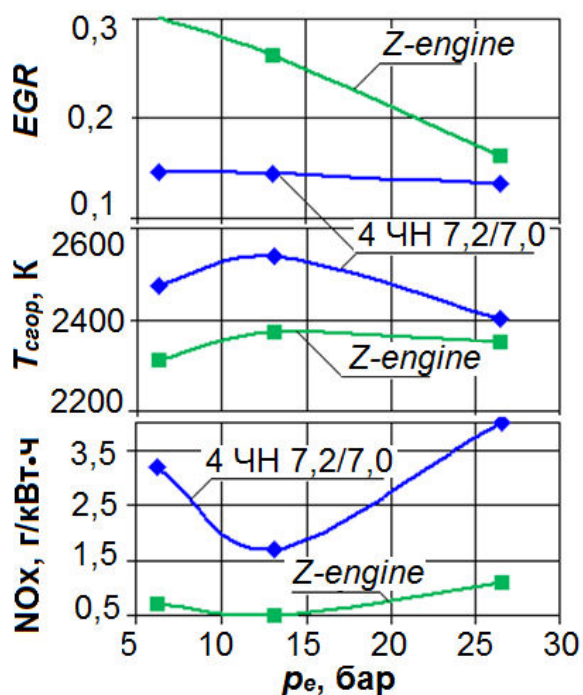


Рис. 3. Показатели исследуемых двигателей в зависимости от нагрузки

Полученные результаты показывают, что при тех же мощности и расходе топлива реализация концепции двигателя типа *Z-engine* позволяет значительно снизить массогабаритные показатели и выбросы оксидов азота. Однако наилучшие показатели этого двигателя достигаются при реализации в нем *HCCI*-процесса. Поэтому на втором этапе расчетных исследований проведено сравнение результатов реализации традиционного дизельного процесса в двухцилиндровом двигателе типа *Z-engine* размерностью $D/S = 80/80$ и реализации процесса *SA HCCI* – с воспламенением рабочей смеси от свечи зажигания. При моделировании *SA HCCI*-процесса реализован подход совместного использования ПК *Ansys Fluent*, *ВПРЫСК* и *ДИЗЕЛЬ-ПК*, который основан на методике, представленной на Рис. 1. Результаты *CFD*-моделирования были использованы для отладки модели смесеобразования в ПК *ДИЗЕЛЬ-ПК*. Для предотвращения попадания топлива на стенки цилиндра в условиях низкой плотности газов реализована многостадийная стратегия впрыскивания штифтовой форсункой с малым эффективным сечением. Результаты моделирования рабочего процесса двигателя типа *Z-engine* на различных режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ), включая режимы максимального крутящего момента (при $n=2800$ мин⁻¹) и максимальной мощности (при $n=3600$ мин⁻¹), представлены в Таблице 4. ВСХ исследуемого двигателя показана на Рис. 4. Результаты расчетов показывают, что на режиме максимального крутящего момента реализация *SA HCCI*-процесса в двигателе *Z-engine* позволяет снизить удельный эффективный расход топлива почти на 10%, а дымность ОГ – более чем в 10 раз по сравнению с реализацией традиционного дизельного сгорания в этом двигателе. При этом выбросы оксидов азота снижаются по сравнению с традиционными дизелями.

Таблица 4.

Показатели двигателя типа *Z-engine* с реализацией *SA HCCI*-процесса и обычного дизельного процесса

Частота вращения коленчатого вала (тип процесса)	1600 (<i>SA HCCI</i> -процесс)	2800 (<i>SA HCCI</i> -процесс)	3600 (<i>SA HCCI</i> -процесс)	2800 (Дизельный процесс)
Число цилиндров	2			
Диаметр / ход, мм	80/80			
Среднее эффективное давление, бар	30,44	31,11	26,21	28,42
Эффективная мощность, кВт	65,28	116,8	126,5	106,7
Мощность поршневого компрессора, кВт	15,26	25,7	30,5	21,3
Цикловая подача, г	0,069	0,070	0,059	0,070
Количество стадий впрыскивания	3	4	4	1
Степень повышения давления в ТК / КПД	4,0/0,75	4,3/0,76	4,5/0,75	4,3/0,75
Степень повышения давления в поршневом компрессоре / КПД	4,5/0,85	4,5/0,85	4,8/0,85	4,5/0,85
Давление наддува, бар	17,71	18,74	20,88	18,84
Температура наддувочного воздуха, К	315,1	316,4	321,4	313,3
Доля остаточных газов	0,177	0,196	0,245	0,157
Продолжительность впуска, град п.к.в.	16	20	20	20
Коэффициент избытка воздуха	1,498	1,340	1,485	1,160
Давление впрыскивания, бар	832	836	841	1435
Продолжительность впрыскивания, град. п.к.в.	12,4	22,2	24,0	33,8
Диаметр капель d_{32} , мкм	7,30	7,32	7,12	8,10
УОВТ, град. п.к.в. до ВМТ	70	80	80	20
Начало сгорания, град. п.к.в. до ВМТ	-1	-1	1	11,7
Максимальное давление в цилиндре, бар	236,0	238,7	223,0	220,0
Жесткость сгорания $dp/d\phi$, бар/град	6,14	6,60	6,47	10,20
Продолжительность 95% сгорания, град. п.к.в.	31,2	29,4	29,0	71,6
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	202,9	201,4	201,5	220,0
Удельный выброс NO_x , г/(кВт·ч)	0,323	0,821	1,005	0,190
Дымность ОГ, ед. <i>Bosch</i>	0,089	0,093	0,068	1,325
Степень сжатия	13			
Открытие выпускного клапана, град. п.к.в. до НМТ	56			
Закрытие выпускного клапана, град. п.к.в. до ВМТ	72			
Открытие впускного клапана, град. п.к.в. до ВМТ	55			

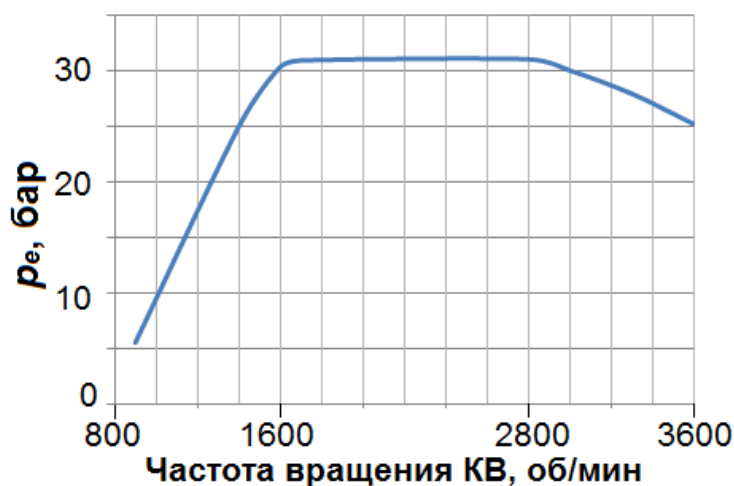


Рис. 4. Внешняя скоростная характеристика исследуемого двигателя типа *Z-engine*

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям показателей рабочего процесса двигателя типа *Z-engine*. Проведенные расчетные исследования показали, что даже реализация традиционного воспламенения рабочей смеси от теплоты сжатия в двигателе типа *Z-engine* позволяет значительно снизить массогабаритные показатели и выбросы оксидов азота при сохранении мощности и расхода топлива на уровне традиционного дизеля. Для оценки эффективности двигателя типа *Z-engine* и определения показателей его рабочего процесса проведены экспериментальные исследования. Двигатель был разработан сотрудниками компании *Aumet Oy* (Финляндия) при участии Технического Исследовательского центра Финляндии (*VTT*). Прототип двигателя был сделан на базе одноцилиндрового четырехтактного дизеля с воздушным охлаждением (Рис. 5,а). Автором диссертации проведены доработка и доводка системы топливоподачи этого двигателя.

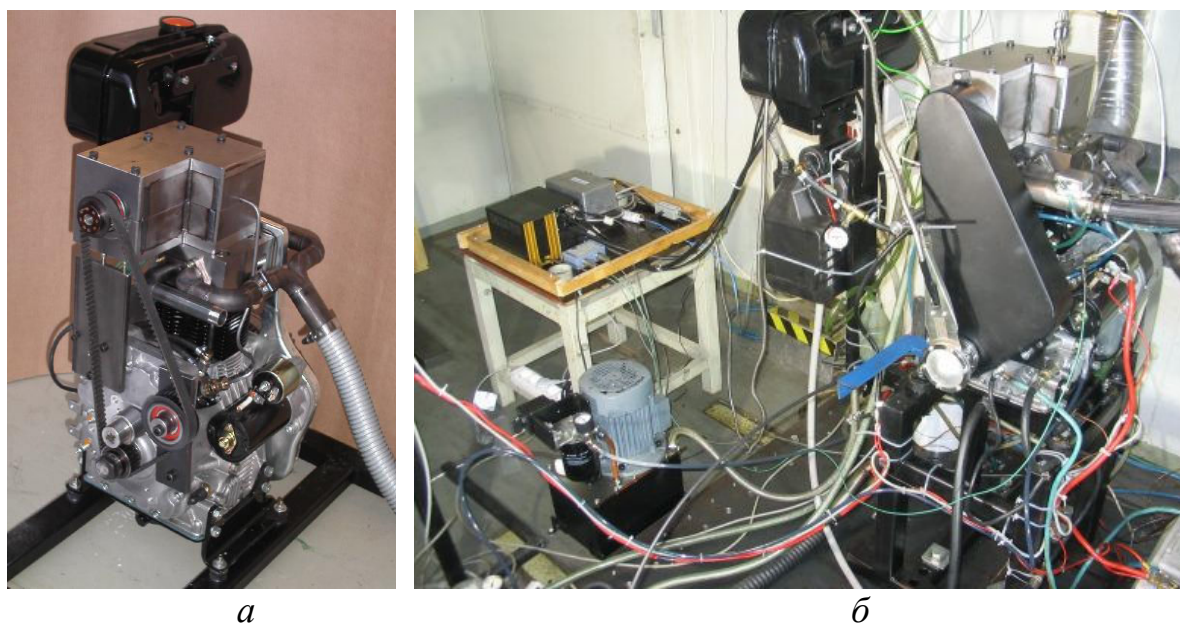


Рис. 5. Прототип двигателя *Z-engine* (а) и испытательный стенд (б)

Экспериментальные исследования прототипа двигателя *Z-engine* проводились на динамометрическом стенде Технического Исследовательского центра Финляндии (VTT) (Рис. 5,б). Повышенное давление впускного воздуха, а так же его направление позволили использовать энергию свежего заряда для интенсификации смесеобразования. Созданию вихревого движения заряда с высокой интенсивностью способствовала также и форма камеры сгорания (КС) (Рис. 6). В соответствии с результатами численных исследований, в двигателе типа *Z-engine* скорости движения потока воздуха достигают таких значений, что вихревое число поднимается до уровня, характерного для вихрекамерных дизелей. Расчеты показали, что высокий уровень турбулентности рабочего заряда в цилиндре сохраняется в течение 20-25 град. п.к.в. после окончания впуска. Это способствует тому, что поток газов в цилиндре разбивает струю топлива и равномерно распределяет испаряющиеся капли по объему КС. В момент прихода поршня к ВМТ турбулентность топливовоздушной смеси не превышает уровня, характерного для четырехтактных дизельных аналогов.

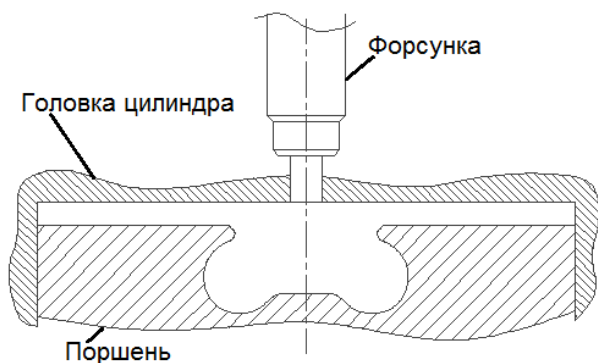


Рис. 6. Схема смесеобразования в прототипе двигателя типа *Z-engine*

После доводки двигателя, на базе Технического Исследовательского центра Финляндии (VTT) были проведены испытания двигателя типа *Z-engine* на частичном нагрузочном режиме. При испытаниях исследовался двигатель типа *Z-engine* с традиционным воспламенением рабочей смеси от теплоты сжатия (не *HCCI*-процесс), был использован ТНВД типа *Bosch PFE*, а форсунка клапанного типа была расположена на оси цилиндра (Рис.6). Данные Таблицы 5, полученные при испытаниях двигателя типа *Z-engine*, свидетельствуют о том, что на режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузкой, соответствующей среднему эффективному давлению $p_e=4,1$ бара, эффективный КПД двигателя составил $\eta_e=0,35$, что соответствует удельному эффективному расходу топлива $g_e=242,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. При этом удельный выброс оксидов азота был равен $e_{\text{NOx}}=0,8 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$.

Для оценки адекватности результатов, получаемых при расчетах с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, проведено их сравнение с полученными в эксперименте данными. В Таблице 5 представлены показатели двигателя типа *Z-engine*, полученные при испытаниях и при моделировании.

Таблица 5.

Показатели прототипа двигателя *Z-engine* на частичном режиме, полученные при эксперименте и при моделировании в ПК ДИЗЕЛЬ-РК

Показатель	Эксперимент на прототипе	Моделирование прототипа
Число цилиндров	1	
Диаметр / Ход, мм	96/92	
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	1600	
Среднее эффективное давление, бар	4,1	4,1
Степень сжатия	32	32
Эффективная мощность, кВт	7,25	7,29
Открытие выпускного клапана, град. п.к.в. до НМТ	60	
Закрытие выпускного клапана, град. п.к.в. до ВМТ	60	
Открытие впускного клапана, град. п.к.в. до ВМТ	60	
Закрытие впускного клапана, град. п.к.в. до ВМТ	44	
Цикловая подача, мг	18,3	
Давление на впуске (после поршневого компрессора), бар	7,8	7,7
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	242	241
Удельный выброс NO _x , г/(кВт·ч)	0,80	0,79

На Рис. 7 представлены индикаторные диаграммы двигателя типа *Z-engine*, полученные в эксперименте и при моделировании, а на Рис. 8 дано сравнение кривых давления в цилиндре в процессе газообмена. Анализ этих данных подтверждает хорошее совпадение результатов, расчетных и экспериментальных характеристик. В частности, сопоставление данных по максимальному давлению цикла показывает, что разница между экспериментально полученным значением ($p_z=117$ бар) и расчетным значением ($p_z=118$ бар) не превышает 1%.

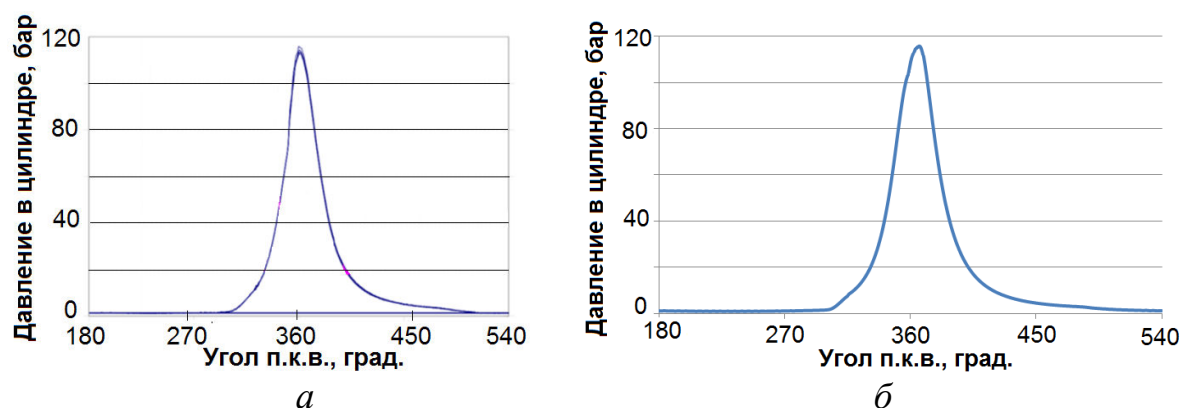


Рис. 7. Индикаторные диаграммы двигателя, полученные при экспериментальных исследованиях (а) и при моделировании (б)

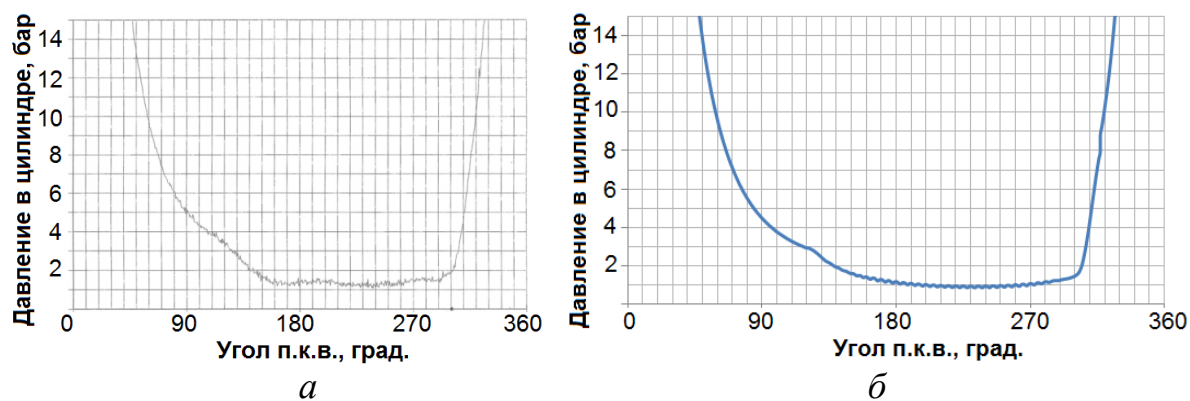


Рис. 8. Характеристики давления в цилиндре в процессе газообмена двигателя, полученные при экспериментальных исследованиях (а) и при моделировании (б)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработана двухэтапная методика расчета процессов впрыскивания и распыливания топлива, с использованием которой можно получить характеристики потока, струй топлива и смесеобразования, показатели качества распыливания и испарения для любой нетрадиционной геометрии распылителя. Реализована методика совместного использования ПК *Ansys Fluent*, ВПРЫСК и ДИЗЕЛЬ-РК для моделирования *HCCI*-процесса при впрыскивании топлива форсункой нетрадиционной геометрии.

2. При проведении расчетных исследований течения топлива в проточной части распылителя форсунки ДВС, продвижения и испарения струй в цилиндре двигателя с использованием программного комплекса *Ansys Fluent* показано влияние кавитации и проникновения воздуха на характеристики потока топлива в распылителях с различной геометрией проточной части.

3. С использованием экспериментальных данных проведены выбор и отладка математических моделей впрыскивания, распыливания и испарения топлива для распылителей с нестандартной геометрией проточной части в условиях кавитации, анализ и сравнение результатов, полученных при использовании различных моделей. В рамках *CFD*-технологий определен набор целесообразных моделей для описания процессов впрыскивания, распыливания и испарения топлива в ДВС.

4. Исследовано влияние различных факторов на показатели распыливания и испарения топлива. Предложены способы ограничения дальности струи и улучшения показателей качества распыливания в условиях низкой плотности газов в цилиндре.

5. Предложена концепция двигателя типа *Z-engine*, который представляет собой двухтактный дизель с клапанным газообменом и процессом сжатия, разделенным на две части – предварительную во внешних агрегатах и финальную в цилиндре двигателя. Разделенный процесс сжатия

и интенсивный быстрый выпуск позволяет отвести достаточное время для процесса выпуска, который происходит около 180 град. п.к.в. В двигателе типа *Z-engine* предварительная стадия сжатия разделена на две ступени – в турбокомпрессоре и приводном поршневом компрессоре со степенью повышения давления равной 4,5-5,5. После поршневого компрессора воздух значительно охлаждается, поэтому работа, затраченная на сжатие, снижается, и воздух в цилиндр поступает с меньшей, чем в традиционных дизелях температурой.

6. Показана целесообразность реализации *HCCI*-процесса и его разновидности *SA HCCI*-процесса в двигателе типа *Z-engine* с целью снижения выбросов с отработавшими газами оксидов азота и дымности ОГ.

7. Проведены моделирование и оптимизация рабочего процесса двухцилиндрового двигателя *Z-engine* с реализацией в нем традиционного дизельного сгорания и его сравнительный анализ с рабочим процессом четырехтактного четырехцилиндрового дизеля той же размерности. Показано, что при тех же мощности и расходе топлива реализация концепции двигателя типа *Z-engine* позволяет значительно снизить массогабаритные показатели и выбросы оксидов азота благодаря низкой температуре в цилиндре перед началом сгорания и высокой степени рециркуляции ОГ.

8. Результаты расчетов показывают, что на режиме максимального крутящего момента реализация *SA HCCI*-процесса в двигателе *Z-engine* позволяет снизить удельный эффективный расход топлива почти на 10%, а дымность ОГ – более чем в 10 раз по сравнению с реализацией традиционного дизельного сгорания в этом двигателе. При этом выбросы оксидов азота снижаются по сравнению с традиционными дизелями.

9. Проведены экспериментальные исследования на одноцилиндровом прототипе двигателя типа *Z-engine* на частичном режиме. Получены индикаторная диаграмма и другие показатели исследуемого двигателя. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=1600$ мин⁻¹ и нагрузкой, соответствующей среднему эффективному давлению $p_e=4,1$ бара, эффективный КПД двигателя составил $\eta_e=0,35$, что соответствует удельному эффективному расходу топлива $g_e=242,0$ г/(кВт·ч). При этом удельный выброс оксидов азота равен $e_{NOx}=0,8$ г/(кВт·ч).

10. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных по исследуемому двигателю типа *Z-engine*, работающему на частичном нагрузочном режиме, и расчетных данных по этому двигателю, полученных с использованием программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК. Сравнительный анализ этих данных подтверждает хорошее совпадение результатов, расчетных и экспериментальных характеристик. В частности, сопоставление данных по максимальному давлению цикла показывает, что разница между экспериментально полученным значением ($p_z=117$ бар) и расчетным значением ($p_z=118$ бар) не превышает 1%.

11. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили работоспособность разработанного двигателя типа *Z-engine* и его эффективность при снижении выбросов с отработавшими газами оксидов азота и дымности ОГ.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Впрыскивание и распыливание топлива в двигателе типа *Z-engine* / В.С. Акимов, А.С. Кулешов и др. // Грузовик. 2015. № 2. С. 14-20 (0,44 п.л. /0,40 п.л.).

2. Двигатель *Z-engine*: оптимизация впрыскивания и распыливания топлива / В.С. Акимов, А.С. Кулешов, В.А. Марков и др. // Автомобильная промышленность. 2015. № 3. С. 17-21 (0,31 п.л. /0,26 п.л.).

3. Двигатель типа *Z-engine* с *HCCI*-процессом / Т.Т. Йанхунен, В.С. Акимов, А.С. Кулешов и др. // Грузовик. 2014. № 10. С. 33-43 (0,69 п.л. /0,33 п.л.).

4. Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смеси биотопливе / В. А. Марков, А.В. Стремяков, В.С. Акимов и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 2. С. 24-29 (0,38 п.л. /0,12 п.л.).

5. Расчетные исследования влияния состава смеси биотоплива на параметры процесса впрыскивания топлива и показатели дизеля / В.А. Марков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский и др. // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2014. № 11. С. 19-32 (0,88 п.л. /0,35 п.л.).

6. Влияние состава смеси биотоплива на параметры процесса впрыскивания топлива в дизеле / В.А. Марков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский и др. // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 12. С. 3-9 (0,44 п.л. /0,14 п.л.).

7. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части / В.А. Марков, А.В. Стремяков, В.С. Акимов В.С. и др. // Грузовик. 2011. № 3. С. 13-17 (0,31 п.л. /0,10 п.л.).

8. Расчетные исследования электронной системы управления топливоподачей дизеля / Л.В. Грехов, В.А. Марков, В.С. Акимов В.С. и др. // Грузовик. 2012. № 11. С. 21-27 (0,44 п.л. /0,13 п.л.).

9. Физико-химические свойства биодизельных топлив и показатели процесса топливоподачи / В.А. Марков, В.С. Акимов, С.Н. Девянин и др. // Грузовик. – 2012. № 3. С. 40-46 (0,44 п.л. /0,15 п.л.).

10. Расчетные исследования показателей транспортного дизеля, работающего на смесях дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла / В.А. Марков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский и др. // Грузовик. 2011. № 4. С. 35-43 (0,56 п.л. /0,21 п.л.).