

На правах рукописи



ДОМБРОВСКИЙ Олег Петрович

**КАЧЕСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ В
ДВУХТАКТНОМ ДВИГАТЕЛЕ С УНИФИЦИРОВАННЫМ
РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре двигателей внутреннего сгорания

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Еникеев Рустэм Далилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры двигателей
внутреннего сгорания ФГБОУ ВПО
«Южно-Уральский государственный
университет»
Шароглазов Борис Александрович

кандидат технических наук, заместитель
главного конструктора ГСКБД
ООО «ЧТЗ-Уралтрак»
Егоров Владимир Владимирович

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Башкирский государствен-
ный аграрный университет», г. Уфа

Защита диссертации состоится 27 марта 2013 г. в 15-00 часов на засе-
дании диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государ-
ственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина,
76, ауд. 1001 гл. корп.

Тел/факс (351)267-91-23,

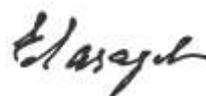
E-mail: D212.298.09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследо-
вательский университет).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан 22 февраля 2013 г.

Ученый секретарь специализиро-
ванного диссертационного совета
Д 212.298.09, доктор технических
наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Благодаря мобильности и экономичности поршневых ДВС именно этот тип тепловых двигателей получил наибольшее распространение. Двухтактные ДВС отличаются низкой удельной массой и большими значениями удельной мощности, что дает преимущества для мобильных применений по сравнению с четырехтактными. Исследованиям в области малогабаритных двухтактных ДВС в мире уделяется повышенное внимание, что обусловлено потребностью в легком, компактном, экономичном двигателе.

Главные недостатки традиционных бензиновых двухтактных двигателей заключаются в потере топлива в период продувки и химической неполноте сгорания при работе на богатых смесях. Кроме того, причинами повышенной токсичности отработавших газов и низкой экономичности в двухтактных двигателях являются пропуски воспламенения, особенно на малых нагрузках и скоростях при дросселировании воздуха вследствие высокого коэффициента остаточных газов. Решением обозначенных проблем может стать применение непосредственного впрыска топлива в двухтактном ДВС и реализация качественного регулирования мощности. Непосредственный впрыск топлива также может быть эффективным инструментом осуществления бездетонационного сгорания при повышенных степенях сжатия.

В течение ряда лет на кафедре ДВС УГАТУ разрабатывается новый рабочий процесс, в основе которого лежит осуществление впрыска топливовоздушной струи непосредственно в камеру сгорания и ее воспламенение электрической искрой. Этот процесс получил наименование унифицированного рабочего процесса (далее УРП). В настоящей работе на двухтактном двигателе реализован рабочий процесс с непосредственным впрыском топливовоздушной смеси, качественным регулированием мощности во всем диапазоне нагрузок и бездетонационным сгоранием при повышенных степенях сжатия. Предложена и реализована методика моделирования процессов смесеобразования и сгорания в рабочей камере двигателя с УРП, позволившая спрогнозировать воспламеняемость и качество сгорания топлива при определенной геометрии камеры сгорания и параметрах впрыска. Актуальность настоящего исследования определяется тем, что реализация разработанных мероприятий позволяет резко повысить топливную экономичность и снизить токсичность отработавших газов двухтактного ДВС.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является определение условий воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси в двухтактном двигателе с искровым воспламенением для обеспечения качественного регулирования мощности во всем диапазоне нагрузок и работы при повышенных степенях сжатия.

В соответствии с целью формулировались задачи исследования:

1. Разработать методику моделирования процессов смесеобразования и горения в камере сгорания двигателя с непосредственным впрыском и искровым воспламенением топливовоздушной смеси.

2. Используя методику моделирования процессов смесеобразования и горения, определить параметры камеры сгорания и системы впрыска двухтактного двигателя с унифицированным рабочим процессом для создания условий оптимального сгорания топлива и обеспечения качественного регулирования мощности во всем диапазоне нагрузок и работы при повышенных степенях сжатия.

3. Экспериментально подтвердить эффективность прогнозных технических решений по исполнению камеры сгорания и параметров впрыска в двигателе с унифицированным рабочим процессом, направленных на реализацию бездетонационного сгорания и качественного регулирования мощности во всем диапазоне нагрузок для улучшения экономичности и снижения токсичности выбросов в двухтактном ДВС.

Методы исследования. При выполнении работы использованы следующие методы исследования:

– методы математического моделирования процессов в сложных технических системах, включая методы численного решения систем обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений, дифференциальных уравнений в частных производных;

– экспериментальные исследования на полноразмерном ДВС.

Исследование носило расчетно-экспериментальный характер. Эффективность мероприятий, разработанных расчетным методом, проверялась экспериментально на полноразмерном ДВС.

Научная новизна.

1. Разработана методика моделирования процессов в системе топливоподачи и рабочей камере для определения условий воспламенения и сгорания в двигателе с непосредственным впрыском топливовоздушной смеси и искровым воспламенением; предложен способ определения граничных условий с использованием математической модели компрессор-форсунки и экспериментальных значений параметров впрыска.

2. Предложен и апробирован метод реализации качественного регулирования мощности во всем диапазоне нагрузок и повышенной степени сжатия, заключающийся в применении непосредственного впрыска топливовоздушной смеси при высоком давлении, оптимизации геометрии камеры сгорания и параметров впрыска и воспламенения.

3. Выявлены закономерности влияния структуры и геометрических параметров камеры сгорания, параметров топливоподачи и воспламенения на качество горения, мощность и экономичность двигателя с непосредственным впрыском и искровым воспламенением в условиях качественного регулирования мощности и повышенной степени сжатия.

Практическая ценность.

Разработанная методика моделирования процессов впрыска, смесеобразования и горения в камере сгорания, а также результаты расчетных исследований внедрены в учебный процесс УГАТУ (г. Уфа). Результаты исследований имеют практическую ценность, а именно позволяют:

1. Прогнозировать структуру и геометрию камеры сгорания, параметры впрыска и воспламенения для обеспечения качественного регулирования мощности и работы при повышенных степенях сжатия в двигателе с непосредственным впрыском и искровым воспламенением топливовоздушной смеси.

2. Улучшать характеристики двухтактных ДВС при проектировании и доводке для удовлетворения требованиям экономичности и токсичности.

На защиту выносятся:

1. Методика моделирования процессов впрыска, смесеобразования и горения в камере сгорания двигателя с непосредственным впрыском и искровым воспламенением топливовоздушной смеси.

2. Метод реализации качественного регулирования мощности во всем диапазоне нагрузок и повышенной степени сжатия, заключающийся в применении непосредственного впрыска топливовоздушной смеси при высоком давлении и оптимизации геометрии камеры сгорания и параметров впрыска и воспламенения.

Достоверность научных положений, результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, основывается на:

– применении признанных научных положений, апробированных методов и средств исследования, современного математического аппарата;

– корректном использовании фундаментальных уравнений механики жидкости и газа и теории рабочих процессов;

– сопоставлении результатов расчетов с данными экспериментов на реальных ПДВС в стендовых условиях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на VI и VII Всероссийских зимних школах-семинарах аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2011, 2012), на IV, V, VI Всероссийских молодежных научных конференциях «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2010, 2011, 2012), на Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения», посвященной 85-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова (г. Уфа, 2011).

Личный вклад соискателя в разработку проблемы: все основные идеи работы сформулированы лично автором. Материалы диссертации основаны на исследованиях автора в период с 2009 по 2012 годы.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах, в том числе в 3 публикациях в центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы. Содержит 159 страниц машинописного текста, включающего 143 рисунка, 7 таблиц и библиографический список из 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, связанной с реализацией непосредственного впрыска топливовоздушной смеси под высоким давлением при качественном регулировании мощности во всем диапазоне нагрузок и реализации бездетонационного сгорания при повышенных степенях сжатия. Формулируются цель и основные задачи исследования, приводятся выносимые на защиту положения и краткое содержание работы.

В первой главе проанализированы основные направления развития двухтактных двигателей. Существенный вклад в их развитие внесли ученые М.Г. Круглов, А.С. Орлин, Н.А. Иващенко, Н.В. Лобов, В.В. Панов, С.В. Гусаков, С.Р. Березин, В.В. Эфрос, *Gordon P. Blair, Robert Fleck, Marco Nuti, Bryan Willson, John B. Heywood* и др. На сегодняшний день обозначилось несколько наиболее эффективных направлений:

1. Совершенствование систем выпуска, продувки, впуска, эффективное использование газодинамических явлений во впускной и выпускной системах.
2. Совершенствование рабочего процесса с целью уменьшения химического недожога топлива и достижения работоспособности на бедных смесях при качественном регулировании мощности.
3. Реализация непосредственного впрыска топлива.
4. Осуществление бездетонационного сгорания при повышенных степенях сжатия.
5. Создание двигателей с турбонаддувом и рекуперацией теплоты отработавших газов.

Анализ перечисленные мероприятий позволил сделать вывод о целесообразности непосредственного впрыска топлива, что также потенциально дает возможность использования турбонаддува или повышения степени сжатия при бездетонационном сгорании и реализации качественного регулирования мощности. Реализация такого рабочего процесса предполагает наибольшую экономию топлива и улучшение экологических показателей двухтактных ДВС. Существующие системы непосредственного впрыска основаны либо на впрыске топливовоздушной смеси при низком давлении (*Orbital, Piaggio*), либо на впрыске чистого топлива при высоком давлении (*FICHT, E-TEC*). Использование в рабочих процессах *Orbital* и *Piaggio* систем топливоподачи с низким давлением не позволяет использовать поздний впрыск топлива. Эта особенность существенно ограничивает возможности реализации высокоэффективного рабочего цикла при работе на низкооктановых топливах. Из-за опасности возникновения преждевременного самовоспламенения и детонации степень сжатия при работе на низкооктановых топливах в таких системах приходится существенно снижать. При этом качественное регулирование мощности в двигателях с искровым воспламенением в полной мере не реализовано нигде в мире. Анализ современных разработок показал отсутствие систем впрыска топливовоздушной смеси при высоком давлении, применение которых должно положительно влиять на качество распыла и подготовки смеси, а также дает возможность эффективно использовать непосредствен-

ный впрыск как инструмент борьбы с детонацией. Именно такой впрыск реализован в унифицированном рабочем процессе, разрабатываемом на кафедре ДВС УГАТУ.

Ни рис. 1 представлена схема двухтактного двигателя с унифицированным рабочим процессом.

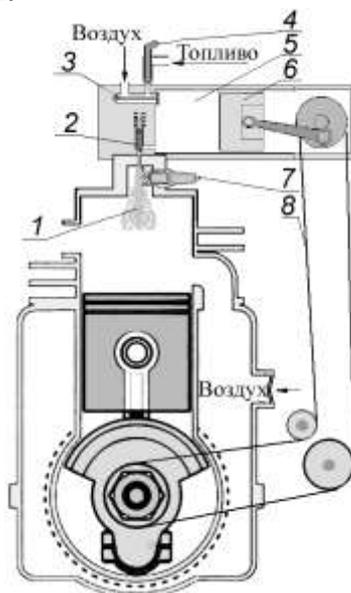


Рисунок 1 – Схема двигателя с УРП: 1 – струя обогащенной топливовоздушной смеси; 2 – распылитель; 3 – тарельчатый клапан; 4 – игольчатый дозатор; 5 – рабочая камера компрессор-форсунки; 6 – поршень КФ; 7 – свеча зажигания; 8 – ременный привод КФ

Для подтверждения гипотезы об улучшении эколого-экономических показателей двухтактного ДВС применением непосредственного впрыска топливовоздушной смеси при высоком давлении, реализации качественного регулирования мощности и бездетонационного сгорания при повышенных степенях сжатия необходимо разработать методику моделирования процессов в системе топливоподдачи и рабочей камере двигателя с УРП для формирования в области электродов свечи зажигания полей концентрации и скоростей топливовоздушной смеси, необходимых для надежного воспламенения и качественного горения в диапазоне нагрузок от полной до холостого хода.

Во второй главе приводится описание методики моделирования процессов впрыска и горения в двигателе с УРП, описание математических моделей, используемых в методике. Приводятся результаты расчетов процессов смесеобразования и сгорания в камере сгорания экспериментального двухтактного двигателя ММВЗ-3.112 с УРП. Расчетным экспериментом подтверждена возможность обеспечения стабильного воспламенения топливовоздушной смеси во всем диапазоне нагрузок без дросселирования воздуха на впуске. Приведены результаты расчетного исследования процесса сгорания в экспериментальном двигателе, показывающие при качественном регулировании мощности низкую продолжительность сгорания, характеризующую полноту горения.

Методика моделирования процессов в КС двигателя с УРП, принципиальная схема которой показана на рис. 2, предполагает первоначальное опре-

деление граничных условий с использованием математической модели рабочего процесса компрессор-форсунки, разработанной на кафедре ДВС УГАТУ. С целью повышения точности расчетов, граничные условия на срезе сопла корректировались с учетом экспериментальных данных о параметрах впрыска. После этого выполняется расчет в пакете гидродинамического компьютерного моделирования.



Рисунок 2 – Принципиальная схема методики моделирования процессов в КС экспериментального двигателя

С целью минимизации расчетного времени расчет проводился в осесимметричной постановке с использованием пакета *Star-CCM+* 7.02. Расчетная сетка пространства рабочей камеры экспериментального двигателя показана на рис. 3.

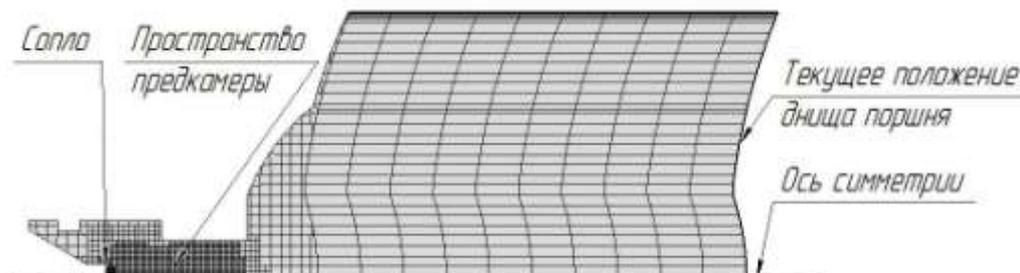


Рисунок 3 – Расчетная сетка рабочей камеры при 105° ПКВ до ВМТ

На срезе сопла распылителя задавались параметры впрыскиваемой топливовоздушной струи, выявленные в результате численных расчетов с использованием математической модели рабочего процесса компрессор-форсунки. Согласно расчету, жидкая фаза топлива на режиме холостого хода полностью испаряется еще до начала впрыска. Топливо в жидкой фазе к моменту впрыска сохраняется только на нагрузочных режимах. Для моделирования жидкой фазы топлива использовался подход Лагранжа.

Управление реакциями процесса горения осуществлялось по модели *Eddy-Break-Up (EBU)*. Согласно *EBU* модели, скорость реакции горения в расчетной зоне определяется минимальной скоростью турбулентной диссипации топлива, окислителя или продуктов реакции:

$$S_{fu} = -\frac{\rho\varepsilon}{k} \min \left(C_R m_{fu}, C_R \frac{m_{ox}}{s}, C'_R \frac{m_{pr}}{1+s} \right),$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ρ – локальная плотность смеси; ε – скорость диссипации турбулентной энергии; C_R и C'_R – эмпирические константы (при расчете равные соответственно 4,0 и 0,5); m_{fu} , m_{ox} , m_{pr} – концентрации (массовые доли) топлива, окислителя и продуктов сгорания; s – стехиометрический коэффициент.

В камере сгорания экспериментального двигателя предусмотрена цилиндрическая предкамера, через которую осуществляется впрыск, и в которой происходит воспламенение смеси. Расчеты полей концентрации и скоростей топливовоздушной смеси с различной геометрией предкамеры показали возможность стабильного воспламенения топливовоздушной смеси на режиме холостого хода без дросселирования воздуха при использовании предкамеры с диаметром проходного сечения 10 мм. Концентрация топлива в области искрового зазора соответствует диапазону $\alpha = 0,86 \div 1,28$ при принятом концентрационном диапазоне воспламеняемости $\alpha = 0,6 \div 1,4$. В дальнейшем, все расчеты горения велись с предкамерой диаметром 10 мм.

Расчеты показали, что при использовании вытеснителя и поршня со сферической выемкой в днище, удастся избежать распространения топлива к стенкам цилиндра при позднем угле опережения впрыска 45° ПКВ и при раннем УОВ 105° ПКВ.

Согласно расчетам, при достижении 50° ПКВ после ВМТ на режиме холостого хода сгорает более 99,9 % топлива. В объеме КС при горении на режиме холостого хода нет областей, в которых отсутствует окислитель, что является следствием не только интенсивного перемешивания смеси даже при позднем впрыске, но и качественного регулирования мощности.

Исследованы нагрузочные режимы при раннем УОВ 105° ПКВ и позднем УОВ 45° ПКВ. Выявлено, что при позднем впрыске к моменту зажигания в камере сгорания сохраняются не испарённые капли топлива (рис. 4).

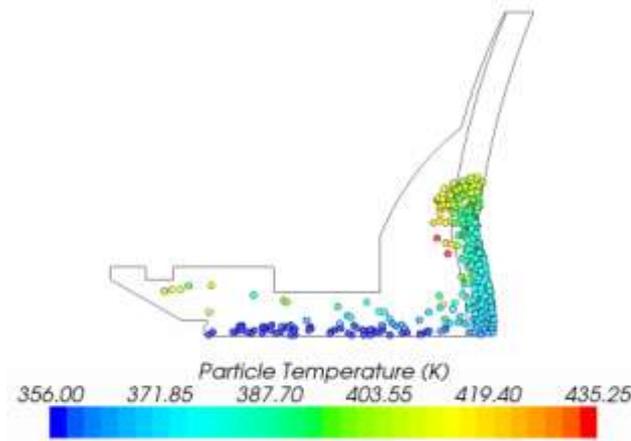


Рисунок 4 – Расчетное распределение капель топлива в камере сгорания экспериментального двигателя ММВЗ-3.112 в момент зажигания; режим полной нагрузки; угол опережения начала впрыска - 45° ПКВ.

При раннем впрыске к моменту зажигания вся жидкая фаза топлива полностью испаряется, что вместе с лучшим перемешиванием смеси способствует снижению продолжительности сгорания на 25 – 30%. Таким образом, ранний впрыск является предпочтительным при отсутствии детонации.

Разработанная методика верифицирована по факту воспламеняемости топливовоздушной смеси, а также по давлению в камере сгорания. Отклонения расчетного максимального давления цикла p_z от экспериментальных значений составило до 6,3%, среднего индикаторного давления p_i – до 6,8%.

В третьей главе дается описание экспериментальной установки с двигателем с унифицированным рабочим процессом, приводятся характеристики базового двигателя, описывается измерительная аппаратура и методика проведения моторного эксперимента. Приведено описание конструкции компрессор-форсунки, осуществляющей впрыск топливовоздушной смеси непосредственно в камеру сгорания. Первичные параметры топливоподачи и геометрия камеры сгорания определены с помощью разработанной методики.

Экспериментальный двигатель с УРП изготовлен на базе одноцилиндрового двухтактного двигателя ММВЗ-3.112 с рабочим объемом $V_h = 123 \text{ см}^3$ и кривошипно-камерной двухканальной возвратно-петлевой продувкой (рис. 5). Ход поршня компрессор-форсунки $S_{КФ} = 24 \text{ мм}$, диаметр $D_{КФ} = 20 \text{ мм}$.

На лабораторном образце реализована бесконтактная схема системы зажигания с датчиком Холла, установка которого на подвижный рычаг позволила бесступенчато осуществлять регулирование угла опережения зажигания на работающем двигателе.

Конструкция компрессор-форсунки разрабатывалась с условием максимальной регулируемости ее параметров. Конструктивно предусмотрено регулирование цикловой подачи топлива, циклового расхода воздуха через КФ, угла опережения впрыска, давления начала впрыска.

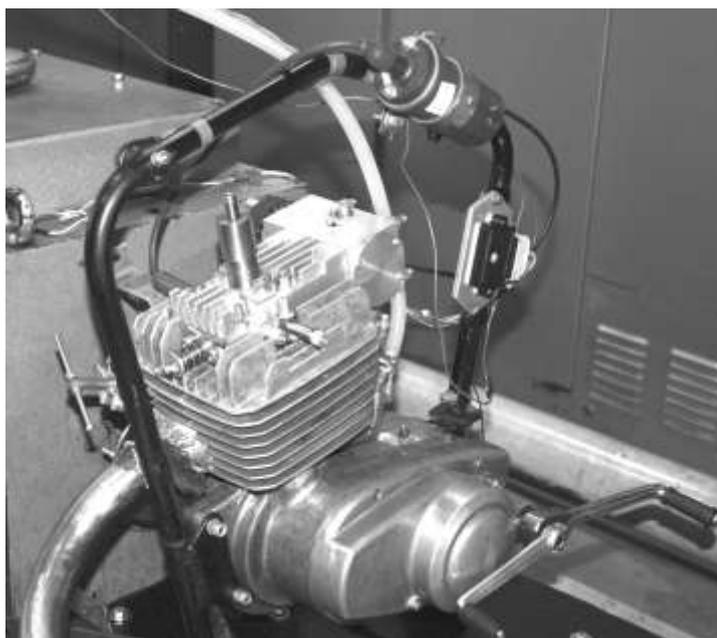


Рисунок 5 – Общий вид двигателя ММВЗ-3.112 с экспериментальной системой топливоподачи и воспламенения

С целью проведения исследований на различных степенях сжатия головка цилиндра экспериментального двигателя доработана до величины геометрической степени сжатия $\varepsilon = 13,5$, которую возможно уменьшать с шагом в 1 ед. за счет добавления прокладок между головкой и гильзой цилиндра.

Экспериментальная исследовательская установка выполнена на базе испытательного стенда *Vsetin 1 DS 541 N*, представляющего собой комплект электрических машин и приборов с балансирным динамометром постоянного тока. Для замера состава отработавших газов использовался газоанализатор *Infralight – 11P*. Для индицирования использовалась система экспериментального анализа фирмы *AVL*.

В четвертой главе приведены результаты моторных экспериментов, показавшие возможность улучшения эколого-экономических показателей двухтактного ДВС с УРП. Эксперименты подтвердили результаты моделирования процессов в камере сгорания двигателя с непосредственным впрыском топлива, искровым воспламенением и качественным регулированием мощности. В качестве топлива использовался стандартный для базового двигателя бензин с октановым числом 80.

В моторных экспериментах на режиме холостого хода подтверждена возможность устойчивого воспламенения смеси при использовании предкамеры диаметром 10 мм, что было спрогнозировано численными экспериментами. При использовании более широких предкамер стабильное воспламенение на режиме холостого хода не обеспечивалось. Определены значения УОЗ и УОВ, обеспечивающие стабильное воспламенение топливовоздушной смеси на режиме холостого хода. УОЗ и УОВ подбирались для каждого эксперимента по критериям минимального расхода топлива и максимальной мощности двигателя. Под углом опережения впрыска в моторных экспериментах понимается угол опережения ВМТ КФ относительно ВМТ двигателя. УОВ должен быть на 4 – 7 ° ПКВ больше, чем УОЗ. Именно при таком согласовании углов опережения зажигания и впрыска создаются условия для воспламенения топливовоздушной смеси искровым разрядом на режиме холостого хода. Дросселирование на впуске не производилось.

В результате дросселирования базового двигателя на режиме холостого хода в рабочем цилиндре образуется большое количество остаточных газов, что является причиной пропусков воспламенения. В экспериментальном двигателе с качественным регулированием пропусков воспламенения нет. На рис. 6 представлено изменение среднего индикаторного давления в цилиндре базового карбюраторного и экспериментального двигателей на режиме холостого хода в 50-ти последовательных рабочих циклах. В 56 % рабочих циклов базового двигателя на режиме холостого хода наблюдались пропуски воспламенения, в то время как экспериментальный двигатель, при использовании предкамеры диаметром 10 мм, работает без пропусков. При использовании более широких предкамер диаметром 11 и 12 мм наблюдались пропуски воспламенения в 30 – 40% рабочих циклов, что предсказывалось моделированием.

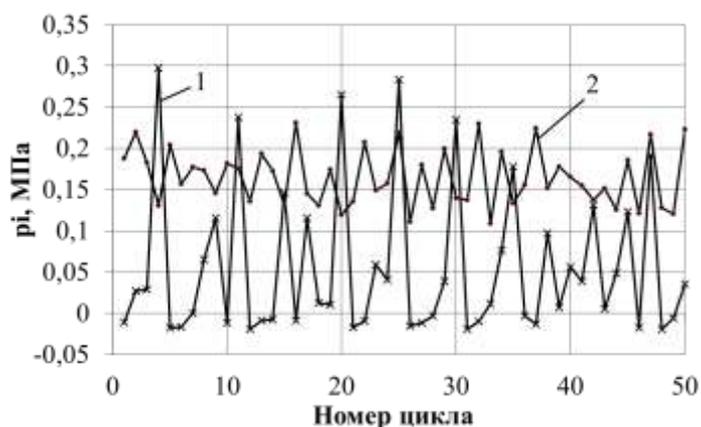


Рисунок 6 – Изменение среднего индикаторного давления в 50-ти последовательных циклах; режим холостого хода: 1 – базовый двигатель; 2 – экспериментальный ДВС.

С целью определения влияния качественного регулирования мощности на расход топлива экспериментального двигателя проведено исследование работы двигателя на сходственных режимах с прикрытой дроссельной заслонкой. Выявлено, что при прикрытии дроссельной заслонки на режиме холостого хода происходит рост часового расхода топлива до 19%.

Минимальный расход топлива экспериментального двигателя на режиме холостого хода составил 113 г/ч, базового – 170 г/ч. Улучшение топливной экономичности на режиме холостого хода составило 33,5%.

Так как экспериментальный двигатель имеет дополнительные механические потери на привод компрессор-форсунки, анализ и сравнение индикаторных показателей рабочих циклов на режимах малой нагрузки и холостого хода производились при условии одинакового среднего индикаторного давления в камере сгорания базового и экспериментального двигателей. На рис. 7 представлены индикаторные диаграммы давления при нагрузке, соответствующей холостому ходу экспериментального двигателя, $p_i = 0,156$ МПа. Коэффициент избытка воздуха определялся расчетно-экспериментальным способом измерением расхода воздуха и расчетом коэффициента продувки в системе имитационного моделирования «Альбея». Коэффициент избытка воздуха на режиме холостого хода составил $\alpha = 3,9$.

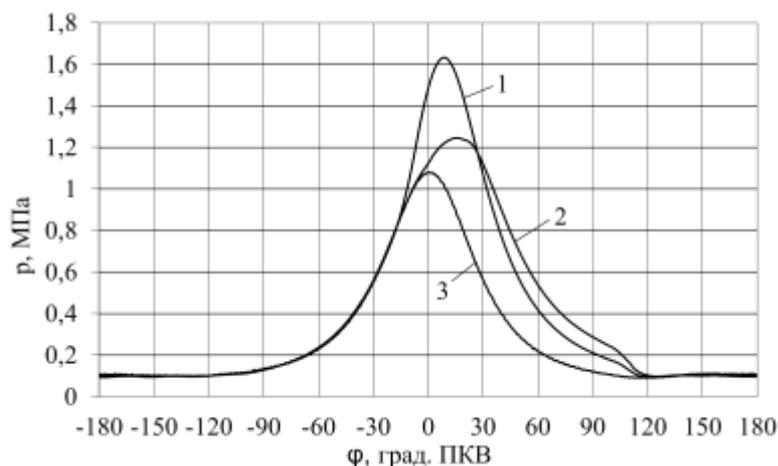


Рисунок 7 – Экспериментальная диаграмма изменения давления p (МПа) от угла поворота коленчатого вала φ ; режим холостого хода; $\alpha = 3,9$:
1 – экспериментальный двигатель; 2 – базовый двигатель; 3 – холодная прокрутка

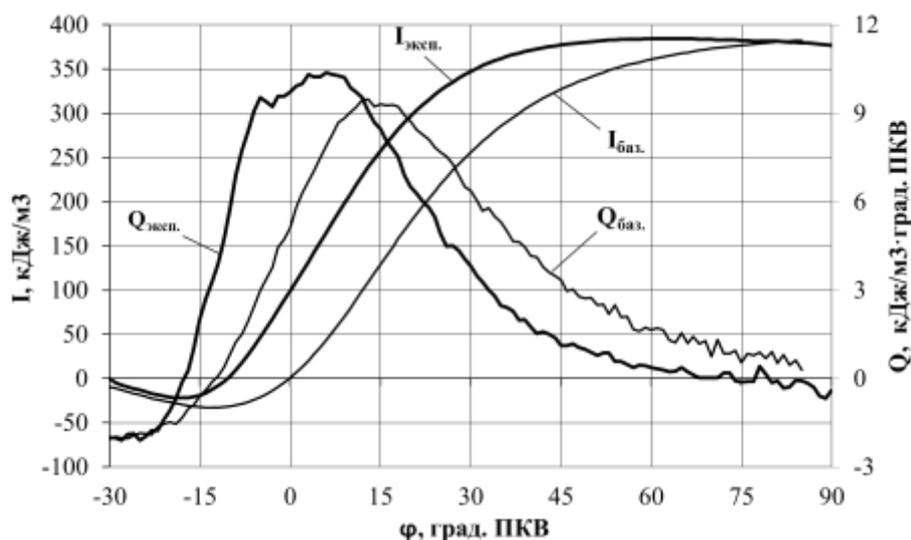


Рисунок 8 – Диаграмма изменения тепловыделения I и скорости теплоподвода Q от угла поворота коленчатого вала φ ; режим холостого хода; $\alpha = 3,9$:

Анализ кривых тепловыделения I и скорости теплоподвода Q экспериментального и базового двигателей (рис. 8) показал, что продолжительность сгорания, характеризующая полноту горения по критерию подвода 99% тепла, в экспериментальном двигателе составляет 64° ПКВ, а в базовом – 88° ПКВ. При этом индикаторный КПД экспериментального двигателя составил 25,55%, а базового – 13,35%, что объясняется не только качественным регулированием мощности, но и отсутствием потерь топлива при продувке.

Экспериментально исследовано влияние угла опережения впрыска на экономические характеристики двигателя на нагрузочных режимах. Выявлено, что оптимальный угол опережения впрыска составляет около 100° ПКВ, что предсказывалось расчетным экспериментом. Большой УОВ способствует лучшему перемешиванию топливоздушнoй смеси и испарению топлива, что положительно влияет на расход топлива. Однако слишком ранний впрыск до закрытия выпускных окон приводит к выбросу топлива в процессе продувки и, как следствие, повышенному расходу топлива.

Экспериментально выявлено, что базовый карбюраторный двигатель на оборотах до 3000 мин^{-1} показывает меньшую эффективную мощность, чем экспериментальный двигатель. При $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ эффективная мощность базового двигателя при полностью открытой дроссельной заслонке составляет 0,46 кВт, мощность экспериментального двигателя с внутренним смесеобразованием составляет 0,88 кВт, что на 91,3 % больше. Это объясняется нестабильностью работы карбюраторного двухтактного двигателя на малых оборотах. Среднее индикаторное давление 32-х % циклов карбюраторного двигателя при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ приближено к нулю, флуктуация максимального индикаторного давления при этом составляет 44 %. Карбюраторный базовый двигатель работает стабильно при оборотах свыше 3000 мин^{-1} , на этом режиме мощности базового и экспериментального двигателей примерно равны и флуктуация среднего индикаторного давления составляет около 9 %. При дальнейшем увеличении скоростного режима эффективная мощность базового двигателя оказывается на 6,7 % выше, чем мощность эксперимен-

тального двигателя, что объясняется влиянием механических потерь на привод компрессор-форсунки. Стабильность работы экспериментального двигателя с компрессор-форсункой на нагрузочных режимах обеспечивается во всем исследованном скоростном диапазоне до $n_{min} = 1000 \text{ мин}^{-1}$. Флуктуация среднего индикаторного давления при этом составляет не более 10%.

Удельный эффективный расход топлива экспериментального двигателя на полной нагрузке на 41,1 – 76,3% ниже, чем карбюраторного ДВС.

Произведен анализ состава отработавших газов экспериментального и базового карбюраторного двигателей (рис. 9).

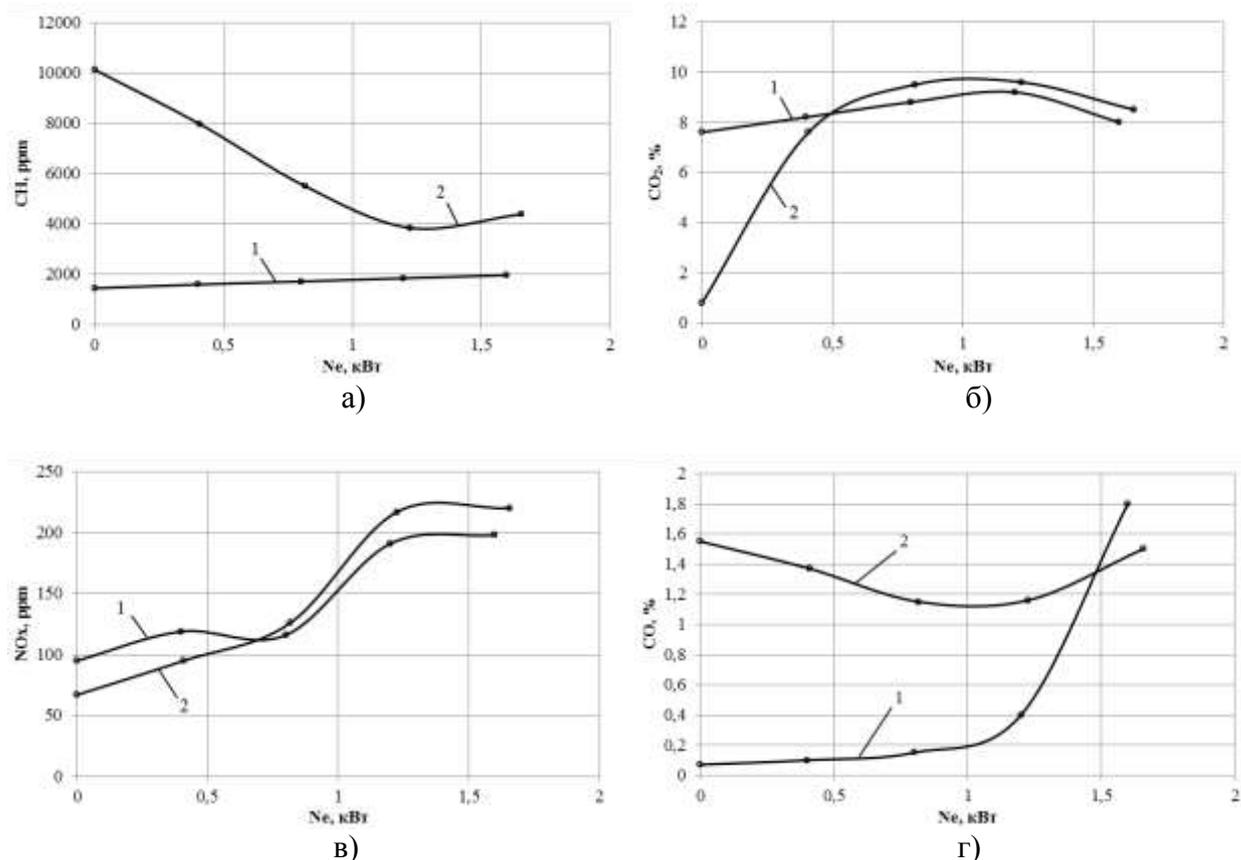


Рисунок 9 – Изменение содержания токсичных компонентов в отработавших газах по нагрузочной характеристике; $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

а) содержание CH_4 ; б) содержание CO_2 ; в) содержание NO_x ; г) содержание CO :
1 – экспериментальный двигатель с КФ; 2 – базовый двигатель.

Содержание углеводородов в отработавших газах экспериментального двигателя существенно снижено по сравнению с базовым во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов (рис. 9а). Наибольший эффект достигается на режимах малой нагрузки и холостого хода, что вызвано пропусками воспламенения при дросселировании базового двигателя. На режиме холостого хода содержание углеводородов в двигателе с качественным регулированием в 7 раз ниже, чем в базовом. Благодаря избытку кислорода на режимах малой нагрузки и холостого хода наблюдается существенно сниженный (до 22 раз) уровень выбросов CO (рис. 9г). Выбросы оксидов азота экспериментального двигателя по сравнению с базовым меняются не существенно (рис. 9в), наблюдается небольшое увеличение содержания NO_x на режимах малой нагрузки и холостого хода, и небольшое снижение содержания NO_x на

режимах, близких к полной нагрузке. Изменение содержания углекислого газа в отработавших газах также не значительно за исключением режима холодного хода, на котором содержание CO_2 в базовом двигателе из-за частых пропусков воспламенения резко снижено (рис. 9б).

С целью подтверждения гипотезы о возможности бездетонационного сгорания при повышенных степенях сжатия и определения влияния степени сжатия на эффективные показатели экспериментального двигателя произведены исследования при повышенных $\varepsilon = 12,5$ и $13,5$, а также пониженной $\varepsilon = 8,5$. На рис. 10 представлены примеры индикаторных диаграмм давления и скорости нарастания давления в камере сгорания экспериментального ДВС на нагрузочных режимах. На стадии расширения не наблюдаются множественные пики давления, а жесткость сгорания не является аномальной, что свидетельствует об отсутствии детонации даже при степени сжатия $\varepsilon = 13,5$.

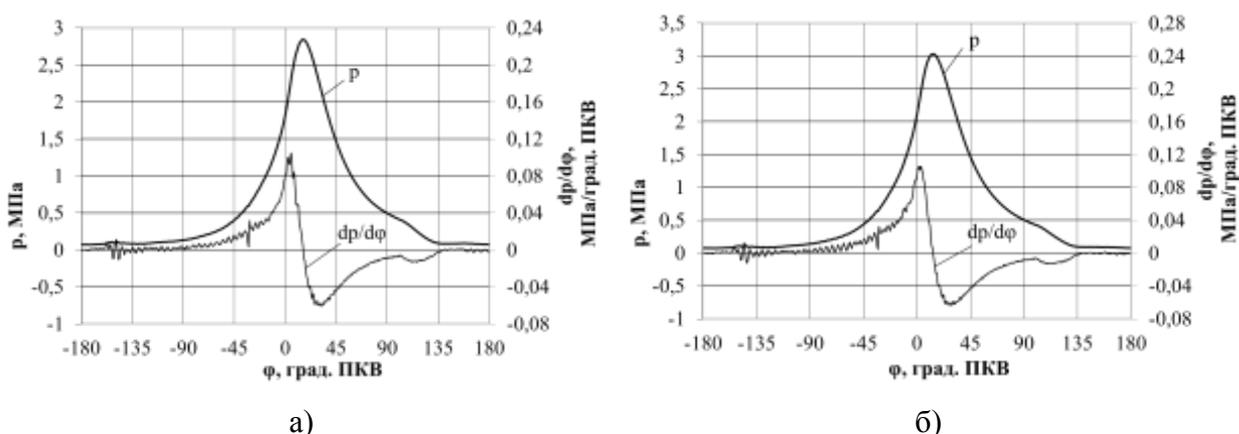


Рисунок 10 – Экспериментальная диаграмма изменения давления p (МПа) и скорости нарастания давления $dp/d\varphi$ (МПа/град. ПКВ) от угла поворота коленчатого вала φ :
а) $\varepsilon = 12,5$; б) $\varepsilon = 13,5$.

Исследованы кривые тепловыделения I и скорости теплоподвода Q при различных степенях сжатия экспериментального ДВС, примеры представлены на рис. 11. При повышении степени сжатия с $\varepsilon = 8,5$ до $\varepsilon = 13,5$ общая продолжительность сгорания на режиме полной нагрузки несущественно снижена с 84 до 81° ПКВ, однако растет доля тепловыделения в основной фазе сгорания.

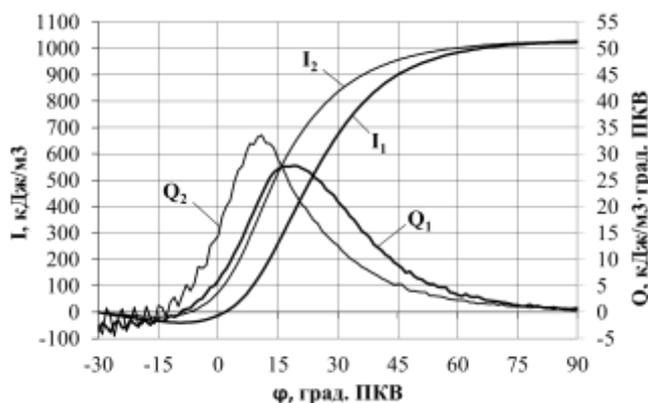


Рисунок 11 – Диаграмма изменения тепловыделения I и скорости теплоподвода Q от угла поворота коленчатого вала; режим полной нагрузки; $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$:
 I_1, Q_1 – при $\varepsilon = 8,5$; I_2, Q_2 – при $\varepsilon = 13,5$

В ходе моторных экспериментов выявлено, что снижение степени сжатия с $\varepsilon = 10,5$ до $\varepsilon = 8,5$ снижает эффективную мощность и топливную экономичность на 3 – 16 %. Повышение степени сжатия до $\varepsilon = 12,5$ приводит к увеличению эффективной мощности на 2 – 4,5 %, эффективный расход топлива при этом существенно снижается. При дальнейшем увеличении степени сжатия до $\varepsilon = 13,5$ изменение эффективных показателей двигателя незначительно. Изменение эффективного удельного расхода топлива по нагрузочным характеристикам показано на рис. 12.

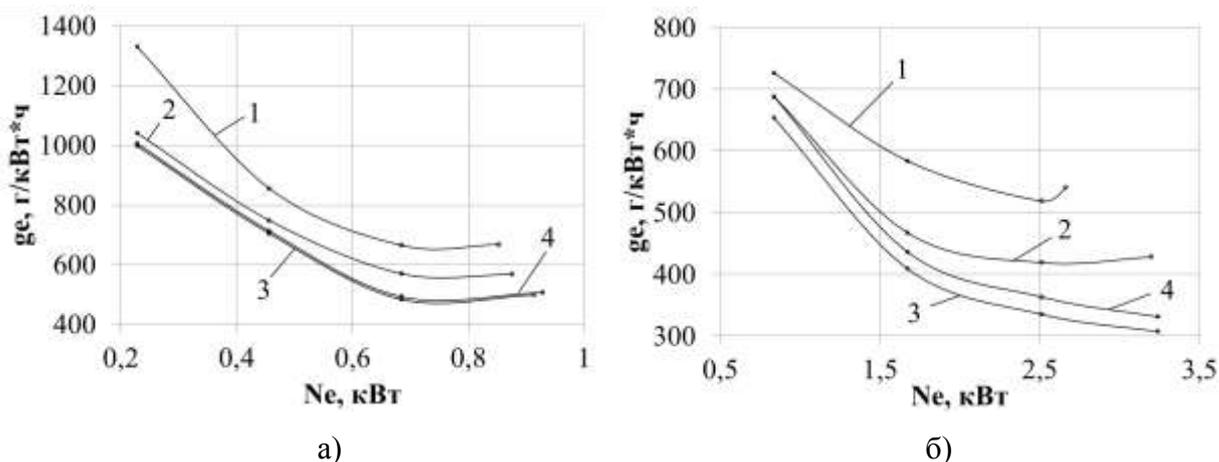


Рисунок 12 – Изменение эффективного удельного расхода топлива экспериментального двигателя по нагрузочной характеристике а) $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, б) $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$:
1 – при $\varepsilon = 8,5$; 2 – при $\varepsilon = 10,5$; 3 – при $\varepsilon = 12,5$; 4 – при $\varepsilon = 13,5$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сформулирована и реализована методика моделирования процессов впрыска, смесеобразования и горения в камере сгорания двигателя с непосредственным впрыском топливовоздушной смеси, искровым воспламенением и качественным регулированием мощности. В основе методики лежат расчеты сжатия топливовоздушной смеси в компрессор-форсунке, течения топливовоздушной смеси в сопле компрессор-форсунки, расчет процессов впрыска и горения в камере сгорания по моделям методами вычислительной гидродинамики. Отклонение расчетного p_z цикла от экспериментальных значений составило до 6,3%, p_i – до 6,8%.

2. Численным экспериментом, с применением разработанной методики моделирования, определены структура и параметры камеры сгорания и системы впрыска двигателя с УРП для обеспечения качественного регулирования мощности. Показано, что воспламенение должно происходить в предкамере цилиндрической формы, расположенной соосно впрыскиваемой топливовоздушной струе. Для экспериментального двухтактного двигателя при расстоянии от сопла форсунки до выходного торца предкамеры 14,5 мм диаметр предкамеры составил 10 мм. Для локализации топлива в центральной части камеры сгорания поршень двигателя должен иметь сферическую выемку, а головка цилиндра и поршень содержать вытеснители, направляющие смесь в центр камеры сгорания и обеспечивающие дополнительное турбулентное перемешивание смеси.

3. Численным экспериментом, с применением разработанной методики моделирования, определены параметры системы впрыска топливовоздушной смеси для создания условий оптимального сгорания и работы при повышенных степенях сжатия. Показано, что ранний впрыск на нагрузочных режимах является предпочтительным при отсутствии детонации. На этих режимах при ранних УОВ (около 105° ПКВ) к моменту зажигания вся жидкая фаза топлива полностью испаряется, что вместе с лучшим перемешиванием способствует снижению продолжительности сгорания на 25 – 30% по сравнению с поздними УОВ (около 45° ПКВ). Бездетонационное сгорание обеспечивается за счет горения гетерогенной смеси и ее охлаждения испаряющимся топливом, что достигается уменьшением УОВ. Расчетный угол опережения начала впрыска на режиме холостого хода составил 45° ПКВ.

4. Экспериментально, стендовыми испытаниями полноразмерного двигателя, подтверждены прогнозы структуры и геометрических параметров камеры сгорания, параметров топливоподачи и воспламенения экспериментального двигателя для стабильного воспламенения и горения топливовоздушной смеси в диапазоне средних по объему камеры сгорания коэффициентов избытка воздуха (от 4,0 до 1,0), позволяющем осуществлять качественное регулирование мощности во всем диапазоне нагрузок.

5. Экспериментально доказана возможность снижения продолжительности сгорания, характеризующей полноту горения топлива, на 37,5% в двухтактном двигателе с УРП при качественном регулировании мощности. Эффект качественного регулирования мощности по топливной экономичности двигателя на режимах малых нагрузок и холостого хода составляет до 19%.

6. Экспериментально выявлено снижение до 7 раз содержания углеводов и до 22 раз содержания монооксида углерода в отработавших газах двигателя с УРП на режиме холостого хода. Содержание оксидов азота при переходе на унифицированный рабочий процесс меняется несущественно.

7. Экспериментальный двигатель до 46,7% экономичнее базового на полной нагрузке на режимах стабильной работы базового двигателя.

8. На режиме полной нагрузки для обеспечения максимальной экономичности и мощности УОВ должен составлять около 100° ПКВ. УОВ на режиме холостого хода должен быть на $4 - 7^\circ$ ПКВ больше, чем УОЗ.

9. Экспериментально подтверждена возможность бездетонационной работы двигателя с УРП на низкооктановом бензине (ОЧИ 80) при повышенных степенях сжатия (до $\varepsilon = 13,5$). Выявлена степень сжатия $\varepsilon = 12,5$, при которой достигается наибольшая топливная экономичность. При увеличении степени сжатия от базового значения $\varepsilon = 10,5$ до $\varepsilon = 12,5$ повышение топливной экономичности составляет от 3,5% до 29% в зависимости от режима работы двигателя. При дальнейшем увеличении степени сжатия существенных изменений эффективных показателей не наблюдается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Гарипов М.Д., Домбровский О.П., Зиннатуллин Р.Ф., Сакулин Р.Ю. Работа поршневого ДВС с искровым воспламенением на обводненном этаноле // Автомобильная промышленность. 2011. № 8. с. 9-11.
2. Еникеев Р.Д., Домбровский О.П., Резванов Д.Р. Двухтактный бензиновый двигатель с регулированием мощности методом изменения состава смеси // Двигателестроение. 2012. № 2. с. 19-24.
3. Еникеев Р.Д., Домбровский О.П., Гарипов М.Д. Экспериментальные характеристики двухтактного бензинового двигателя с высокой степенью сжатия // Двигателестроение. 2012. № 3. с. 7-11.

В других изданиях, включая труды Всероссийских и международных НТК:

4. Домбровский О.П. Улучшение параметров двухтактного ДВС путем использования унифицированного рабочего процесса // Мавлютовские чтения: Материалы конференции. Уфа, УГАТУ. 2010. Т.1. с. 76-78.
5. Домбровский О.П. Двухтактный поршневой двигатель с многотопливным рабочим процессом // Мавлютовские чтения: Материалы российской научно-технической конференции. УГАТУ. 2011. Т.1. с. 53-55.
6. Домбровский О.П., Еникеев Р.Д. Исследование возможности реализации многотопливного рабочего процесса на двухтактном двигателе // Мавлютовские чтения: Материалы российской научно-технической конференции. Уфа, УГАТУ. 2011. Т.2. с. 63-67.
7. Домбровский О.П. Исследование возможности создания перспективного двухтактного двигателя с многотопливным рабочим процессом // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов шестой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых учёных. УГАТУ. 2011. Том 2, «Машиностроение, электроника, приборостроение, управление и экономика» – с. 56-60.
8. Домбровский О.П. Двухтактный двигатель с непосредственным впрыском и качественным регулированием // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов седьмой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых учёных. УГАТУ. 2012. Том 2, «Машиностроение, электроника, приборостроение» – с. 94-97.
9. Домбровский О.П. Результаты экспериментального исследования двигателя с унифицированным рабочим процессом // Мавлютовские чтения: Материалы российской научно-технической конференции. УГАТУ. 2012. Т.1. с. 68-70.

Диссертант



О. П. Домбровский