

На правах рукописи

Быстров Олег Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ  
ПУТЁМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО  
ШЕСТИТАКТНОГО ЦИКЛА**

Специальность 05.04.02 - «Тепловые двигатели»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2008

Работа выполнена на кафедре «Двигатели» Челябинского высшего военного автомобильного командно-инженерного училища (военного института)

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
В.С. Кукис

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
А.Н. Лаврик  
кандидат технических наук, доцент  
А.Ф. Малышев

Ведущая организация - ОАО «НИИ Автотракторной техники»

Защита состоится «24» декабря 2008 г. в « 14.00 » часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080. г. Челябинск, просп. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета. (E-mail: d212.298.09@mail.ru).

Автореферат разослан «20» ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор техн. наук, профессор

Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время со всей остротой встают проблемы истощения природных ископаемых энергоресурсов, в первую очередь, нефти, и угрожающего экологической катастрофой загрязнения окружающей среды отходами многообразной деятельности человека.

В поршневых двигателях внутреннего сгорания (ПДВС) процесс превращения теплоты сжигаемого топлива в работу сопровождается значительными «потерями» энергии. В первую очередь это относится к «потерям» теплоты с отработавшими газами (ОГ). В дизелях они составляют 85-110 % по отношению к эффективной мощности, в двигателях с принудительным воспламенением топлива превосходят ее на 25-45 %. Эту энергию можно утилизировать. Весьма важным направлением при утилизации «потерь» энергии является использование ее для выработки дополнительной работы.

Существует целый ряд технических систем, которые могут быть использованы для утилизации теплоты ОГ ДВС с целью трансформации ее в работу (Шокотов Н.К., 1980; Жмудяк Л.М., 1981; Зайцев С.В., 1984; Шейпак А.А., 1991; Кукис В.С., 1991, 2000, Руднев В.В., 2004, Meijer R.J., El – Masti M.A. и др.). Сравнительный анализ этих систем, проведенный в настоящей работе, показал перспективность применения комбинированного шеститактного рабочего цикла, предложенного автором.

Двигатель, реализующий такой цикл, работает следующим образом. Первые три такта (впуск, сжатие и рабочий ход) осуществляются в полном соответствии с тактами четырехтактного дизеля. В конце расширения выпускной клапан не открывается. Следующий такт – сжатие отработавших газов (ОГ). В конце этого такта через водяную форсунку, под высоким давлением в объем камеры сгорания впрыскивается вода. В период следующего за этим расширения перегретый пар совершает полезную работу. В конце этого, пятого по счёту такта начинает открываться выпускной клапан. Далее следует такт выпуска. Затем описанный цикл повторяется.

Более полное использование термохимической энергии топлива применением шеститактного комбинированного рабочего цикла позволяет повысить не только мощностные, но и экономические показатели силовой установки, а также существенно снизить дымность и токсичность, выбрасываемых в атмосферу газов. Работы, посвященные исследованию комбинированного шеститактного рабочего цикла, в литературе отсутствуют.

**Цель работы:** – повысить экономические и улучшить экологические показатели дизеля за счет более полного использования термохимической энергии топлива применением шеститактного комбинированного рабочего цикла.

### **Задачи исследования:**

1. Разработать термодинамическую и математическую модели шести-

тактного рабочего цикла, сочетающего сгорание топлива с последующей подачей воды в цилиндр, для более полного использования энергии продуктов сгорания топлива.

2. Теоретически оценить эффективность введения в рабочий цикл дополнительных тактов.

3. На базе четырёхтактного ПДВС разработать экспериментальную установку (с системой для подачи в цилиндр воды) в которой возможна реализация шеститактного рабочего цикла и проверить ее работоспособность.

4. Установить закономерности изменения основных показателей шеститактного рабочего цикла в функции параметров, определяющих подачу воды в цилиндр двигателя.

5. Экспериментально оценить эффективность использования термодинамической энергии топлива при реализации шеститактного комбинированного рабочего цикла. Проверить адекватность разработанной математической модели.

6. Экспериментально определить сочетание параметров впрыскивания воды в исследуемый шеститактный поршневой двигатель, обеспечивающее наибольшее среднее индикаторное давление.

7. Оценить повышение эффективности использования энергии топлива при реализации шеститактного рабочего цикла по сравнению с четырёхтактным.

**Объектом исследования** являлся рабочий цикл шеститактного комбинированного двигателя, выполненного на базе одноцилиндрового четырёхтактного дизеля воздушного охлаждения типа ЧВ 12/12,5.

**Предметом исследования** служили показатели комбинированного двигателя и процессы, протекающие в цилиндре при его работе.

**Методы исследования.** Работа базировалась на экспериментальных и расчётно-экспериментальных методах исследования с использованием традиционных и специальных приборов и оборудования.

**Научная новизна** работы заключается в следующих положениях, выносимых автором на защиту:

- экспериментально подтверждена гипотеза о возможности одновременного повышения экономических и экологических показателей ПДВС за счет более полного использования энергии топлива применением шеститактного комбинированного рабочего цикла;

- создана термодинамическая и математическая модели, позволяющие исследовать процессы в цилиндре при работе шеститактного комбинированного двигателя, влияние момента начала впрыскивания, давления и количества воды подаваемой в цилиндр двигателя на его мощностные, экономические и экологические показатели;

- установлена взаимосвязь между давлением, количеством и моментом начала впрыскивания воды в цилиндр шеститактного двигателя с одной стороны и его мощностными, экономическими и экологическими показателями – с другой, а также объяснена природа установленных взаимосвязей.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что использование полученной математической модели позволяет расчетным путем оценить влияние давления, количества и момента начала впрыскивания воды в цилиндр шеститактного двигателя на его мощностные, экономические и экологические показатели, а также определить сочетание параметров впрыскивания воды в исследуемый шеститактный поршневой двигатель, обеспечивающее наибольшее среднее индикаторное давление.

Представленные в диссертации материалы могут найти применение в научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях и на заводах, занимающихся созданием ПДВС и теплосиловых установок на их базе.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационного исследования используются при выполнении НИОКР в НПК «Агродизель» (г. Москва), а также в учебном процессе Челябинского высшего военного автомобильного командно-инженерного училища (военного института).

**Апробация работы.** Основные положения диссертации были доложены и одобрены на научно-методических семинарах с участием сотрудников кафедр «Двигатели», «Эксплуатация военной автомобильной техники» и «Автомобильная техника» Челябинского военного автомобильного института (Челябинск, 2005-08 гг.); на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии: -энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (Барнаул, 2007 г.), на IV Международном технологическом конгрессе «Военная техника, вооружение и современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения» (Омск 4-9 июня 2007 г.), на межвузовской научно-технической конференции «Повышение эффективности силовых установок колёсных и гусеничных машин» (Челябинск, 2008 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано семь печатных работ, в том числе две в изданиях, рекомендованных ВАК, получено положительное решение на полезную модель.

Диссертация содержит 157 страниц машинописного текста, включающего 40 рисунков, 16 таблиц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка основной использованной литературы (161 наименование) и приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна и практическая ценность, кон-

кретизированы объект и предмет исследования, приведены научная новизна, практическая значимость, дана общая характеристика диссертационного исследования.

В *первой главе* рассмотрены «потери» энергии при работе ПДВС, оценены «потери» теплоты с ОГ. Обоснована целесообразность утилизации этой теплоты для получения дополнительной работы. Рассмотрены известные варианты систем утилизации и сделан вывод о перспективности преобразования четырёхтактного рабочего цикла в комбинированный шеститактный для улучшения использования энергии топлива. В заключение первой главы сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

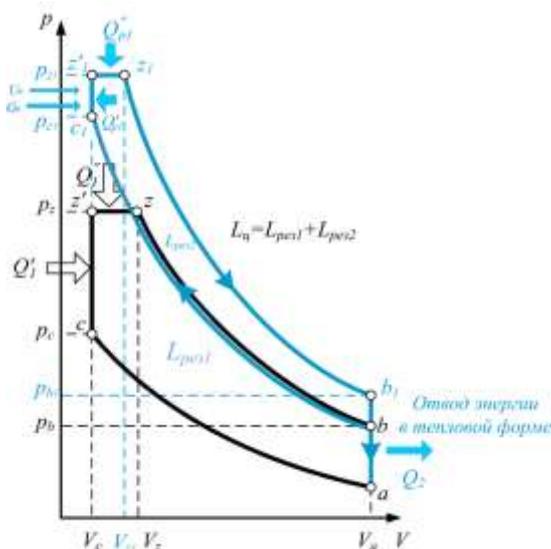


Рис.1. Термодинамический цикл шеститактного комбинированного двигателя

Во *второй главе* рассмотрена термодинамическая модель комбинированного шеститактного цикла (рис.1). Теоретически проанализированы основные закономерности процессов идеализированного шеститактного комбинированного цикла. Описан процесс смещения рабочего тела.

Рассмотрен рабочий цикл комбинированного двигателя. Выявлены основные регулирующие параметры впрыска воды, оказывающие влияние на эффективность предложенного двигателя.

На основе рассмотренных связей сформулирован перечень показателей для всесторонней оценки достижения поставленной в настоящем исследовании

цели. В этот перечень вошли степени повышения мощностных и экономических характеристик шеститактного двигателя, а также степени снижения дымности и токсичности его ОГ.

**Третья глава** посвящена разработке математической модели рабочего процесса шеститактного двигателя. В её основу положена многократно апробированная модель ЦНИДИ Б.М.Гончара (при моделировании принят закон выгорания Вибе), включающая основные балансовые уравнения массы и энергии рабочего тела в цилиндре двигателя, дополненная дифференциальными уравнениями процессов происходящих в четвёртом и пятом тактах:

Количество воды, поступившее внутрь цилиндра:

$$\frac{dG_e}{d\varphi} = \frac{\mu_c f_c}{6n} \sqrt{2\rho_e(p_e - p)}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{град ПКВ}}, \quad (1)$$

где  $\mu_c$  - коэффициент расхода воды через сопловое отверстие форсунки;  $f_c$  - площадь проходного сечения сопловых отверстий форсунки, м<sup>2</sup>;  $\rho_e$  - плотность воды кг/м<sup>3</sup>;  $p_e$  - давление впрыскивания воды, Па;  $p$  - давление рабочего тела в цилиндре, Па.

Количество энергии, затрачиваемое на парообразование: от жидкого состояния до состояния перегретого пара:

$$\frac{dQ'_p}{d\varphi} = \frac{dG_e}{d\varphi} [c_e(T_n - T_e) + c_{vн} (T_n - T_n) + r], \quad \frac{\text{кДж}}{\text{град ПКВ}} \quad (2)$$

где  $c_e$ ,  $c_{vн}$ ,  $c_{vн}$  - удельные массовые теплоемкости воды, сухого и перегретого пара;  $T_e$ ,  $T_n$ ,  $T_n$  - температура воды, её кипения и сухого пара при соответствующих параметрах в цилиндре;  $r$  - удельная теплота парообразования.

Математическая модель была дополнена справочными и экспериментальными данными и зависимостями. В частности, для определения количества энергии, затрачиваемой на парообразование впрыскиваемой в цилиндр воды, в программу Excel были введены термодинамические свойства воды и водяного пара в ожидаемом диапазоне давлений, заимствованные из справочной литературы. Далее эти данные были аппроксимированы и получены функциональные зависимости: температуры насыщения от текущего давления в цилиндре, теплоемкости от температуры насыщения, удельной теплоты парообразования от давления, теплоемкости перегретого пара от текущей температуры, являющейся температурой перегрева. Эти функциональные зависимости были использованы в дальнейшем при реализации математической модели. Чтобы замкнуть систему уравнений необходимо знать показатель политропы сжатия продуктов сгорания, который, в свою очередь, является функцией температуры продуктов сгорания, температуры стенок цилиндра шеститактного двигателя и частоты вращения его коленчатого вала. Для нахождения указанных параметров был проведён соответствующий эксперимент.

При моделировании рабочего процесса была использована система визуального проектирования SIMULINK пакета MATLAB. Исходными данными служили параметры, характеризующие теплофизические свойства рабочего тела, конструктивные показатели шеститактного двигателя и условия подачи в него воды. Все расчеты производились методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Максимальный шаг моделирования был выбран равным 0,0005 с, максимальное модельное время 2 с. Начальные приближения вычислялись автоматически или вводились вручную. Относительная погрешность расчета устанавливалась на уровне 0,1 %. При этом система была представлена в виде нескольких подсистем (блоков), имеющих внутренние и внешние связи. Каждая подсистема, в свою очередь, была разделена на более мелкие элементы до необходимого уровня детализации. Созданная модель позволяет рассчитать и представить в числовом и графическом виде индикаторную мощность, литровую индикаторную мощность, среднее индикаторное давление, удельный индикаторный расход воды и индикаторный КПД шеститактного двигателя, а также изменение любого рассчитываемого параметра рабочего процесса в функции другого параметра или времени.

В *четвертой главе* дано описание экспериментальной установки. В ее состав вошли: одноцилиндровый шеститактный двигатель воздушного охлаждения, выполненный на базе одноцилиндрового дизеля типа ЧВ 12/12,5; испытательный стенд DS-1036-4/N; приборы для исследования рабочего процесса и определения мощностных, экономических и экологических показателей шеститактного двигателя. Система питания одноцилиндрового двигателя состоит из двух односекционных насосов высокого давления плунжерного типа (сегмент ТНВД НК-12М дизеля Д12А-525 для подачи воды, сегмент ТНВД Урал-744 для подачи топлива). Секция насоса, предназначенная для подачи под высоким давлением дизельного топлива, установлена на индивидуальном валу, приводимом от коленчатого вала шестерённой передачей. Секция водяного насоса высокого давления установлена соосно с распределительным валом. Профили кулачков кулачкового вала, в связи с уменьшенной угловой скоростью, по аналогии с кулачками распределительного вала, незначительно изменены. Плунжерная пара водяной секции обеспечивала максимальную цикловую подачу воды – 0,8 см<sup>3</sup>. Изменение цикловой подачи осуществлялось рейкой насоса. Изменение угла опережения впрыска воды осуществлялось регулировочным болтом толкателя плунжера. Для подачи воды в цилиндр, в головку цилиндра была установлена дополнительная форсунка (многодырчатая с гидравлическим подъёмом иглы). Распылитель форсунки имеет восемь отверстий диаметром 0,3 мм. Изменение давления подачи воды осуществлялось при помощи регулировочного винта форсунки.

Методика проведения экспериментального исследования включала четыре этапа.

На *первом этапе* в ходе натурального эксперимента решалась задача проверки работоспособности шеститактного двигателя, определения влияния параметров процесса впрыскивания воды на величину показателя политропы процесса сжатия рабочего тела в цилиндре двигателя, на изменение дымности и токсичности ОГ, а также получение математической модели, описывающей взаимосвязи между перечисленными выше показателями с помощью полиномиальных аппроксимационных уравнений.

*Второй этап* проведения экспериментов предполагал решение системы уравнений, описывающих внутрицилиндровые процессы в шеститактном двигателе, компьютерное моделирование этих процессов и проверку адекватности разработанной модели.

На *третьем этапе* экспериментального исследования был изучен рабочий процесс шеститактного двигателя, с использованием разработанной математической модели проводился анализ влияния параметров впрыска воды на среднее индикаторное давление; литровую индикаторную мощность; удельный индикаторный расход воды; удельный индикаторный расход топлива; индикаторный КПД шеститактного двигателя. Расчетные оптимизированные данные проверялись на экспериментальной установке

**Пятая** глава содержит результаты экспериментальных исследований.

На *первом этапе* были получены полиномиальные зависимости, описывающие влияние давления впрыскивания воды в цилиндр; количества впрыскиваемой воды (цикловой подачи); момента начала впрыскивания воды в цилиндр на частоту вращения коленчатого вала шеститактного двигателя, показатель политропы процесса сжатия в нем продуктов сгорания, на дымность и токсичность ОГ. Адекватность полученных уравнений была подтверждена с использованием критерия Фишера.

Для определения коэффициентов уравнений был реализован экспериментальный план Хартли на гиперкубе (близкий по своим статистическим характеристикам D-оптимальному плану), предусматривающий проведение 27 опытов. В результате обработки данных эксперимента были найдены полиномиальные зависимости:

- для степени изменения частоты вращения коленчатого вала шеститактного двигателя:

$$\Delta n = 1154 + 83,9X_1 + 141,1X_2 + 25,0X_3 - 19,2X_1^2 - 4,2X_2^2 - 39,2X_3^2 + 38,8X_1X_2; \quad (3)$$

- для определения показателя политропы процесса сжатия:

$$n_{сж} = 1,209 + 0,029X_1 + 0,050X_2 + 0,007X_3 - 0,010X_1^2 - 0,030X_3^2 + 0,012X_1X_2; \quad (4)$$

- для степени снижения дымности ОГ:

$$\Delta C_D = 0,42 + 0,15X_1 + 0,12X_2 - 0,01X_3 - 0,026X_1X_2 + 0,028X_1X_3 - 0,027X_2X_3; \quad (5)$$

- для степени снижения концентрации оксида углерода в ОГ:

$$\Delta C_{CO} = 0,52 + 0,152X_1 + 0,2X_2 - 0,09X_3 - 0,01X_2^2; \quad (6)$$

- для степени снижения концентрации углеводородов в ОГ:

$$\Delta C_{\text{CH}} = 0,45 + 0,1X_1 + 0,09X_2 + 0,014X_1X_2 - 0,008X_1X_3 + 0,009X_2X_3; \quad (7)$$

- для степени снижения концентрации оксидов азота в ОГ:

$$\Delta C_{\text{NOx}} = 0,1835 + 0,12X_1 + 0,1X_2 + 0,01X_3 + 0,09X_2^2 - 0,034X_1X_3; \quad (8)$$

В уравнениях (3-8)  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  – соответствующие кодовые значения задаваемых параметров впрыска воды.

Адекватность полученных уравнений, проверенная с использованием критерия Фишера, нашла подтверждение с вероятностью совпадения результатов расчета и эксперимента не менее чем в 95 % случаев.

Полученные уравнения позволяют оценивать влияние каждого из рассмотренных факторов и их взаимодействия на выходные параметры. В диссертации подробно обсуждена природа выявленных закономерностей.

На *втором* этапе для проверки адекватности математической модели рабочего процесса шеститактного двигателя были использованы полученные на первом этапе индикаторные диаграммы для 27 режимов работы двигателя. Затем через площадь свернутых индикаторных диаграмм, были определены значения индикаторной работы и среднего индикаторного давления. После этого были рассчитаны величины среднего индикаторного давления по исходным данным тех же режимов работы экспериментальной установки. Далее по известным статистическим формулам было определено расчетное значение критерия Стьюдента. Оно оказалось меньше табличного значения, что свидетельствует об адекватности математической модели и эксперимента с достоверностью не менее 95 %. Представленные в диссертации расчетная и экспериментальная диаграммы для одного из исследованных режимов работы экспериментальной установки также подтверждают адекватность модели.

Далее, с помощью созданной математической модели, был установлен характер влияния регулировочных параметров его системы подачи воды на индикаторные показатели последнего. Результаты этого исследования детально проанализированы в диссертации, а основные положения приведены в выводах по работе. Пример влияния давления впрыска на индикаторные показатели шеститактного двигателя показан на рис.2.

На *третьем* этапе производился выбор сочетания параметров впрыскивания воды в исследуемый шеститактный поршневой двигатель, обеспечивающего наибольшее среднее индикаторное давление. Расчёты и эксперименты показали, что наибольшее среднее индикаторное давление достигается при давлении впрыска воды  $p_{\text{впр}} = 23$  МПа; цикловой подаче воды  $G_{\text{в}} = 0,63$  г за цикл; при этом угол опережения впрыскивания воды  $\Theta = 20$  град ПКВ до ВМТ.

Исследуемые индикаторные показатели, при указанных параметрах впрыскивания воды, составили: индикаторная мощность шеститактного двигателя  $N_i = 29$  кВт, литровая индикаторная мощность  $N_{i \cdot л} = 20,3$  кВт/л, среднее индикаторное давление  $p_i = 1,39$  МПа, индикаторный КПД  $\eta_i = 59\%$ , удельный

индикаторный расход воды  $g_{iv} = 1,11 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ , удельный индикаторный расход топлива  $g_i = 116,8 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$

Результаты сравнения индикаторных показателей базового четырёхтактного дизеля с показателями комбинированного шеститактного двигателя свидетельствуют, что применение шеститактного комбинированного цикла позволяет повысить индикаторную мощность дизеля на 11,5 %, среднее индикаторное давление на 63,5%, индикаторный КПД на 34%, снизить удельный индикаторный расход топлива на 33,2%.

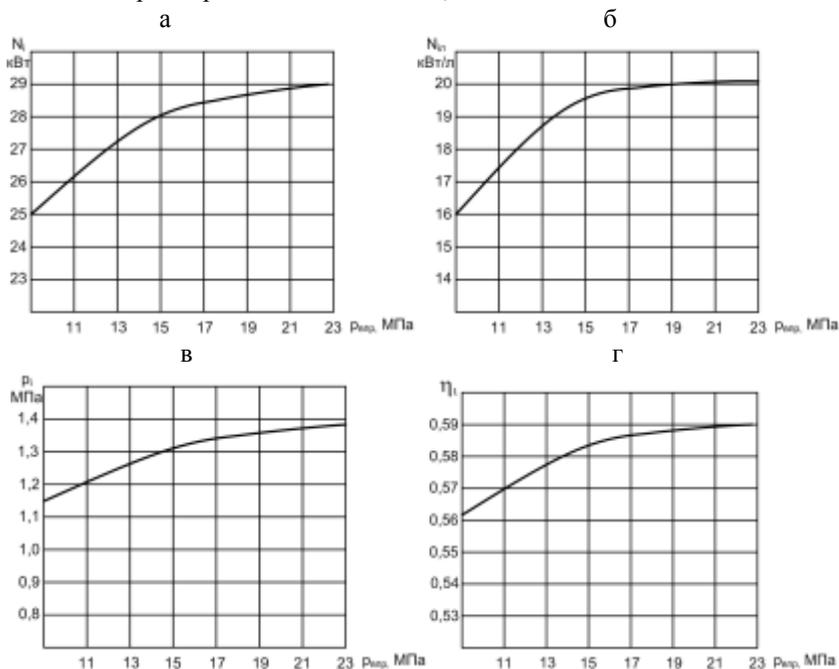


Рис. 2. Зависимость индикаторной мощности (а), литровой индикаторной мощности (б), среднего индикаторного давления (в) и индикаторного КПД (г) шеститактного двигателя от давления впрыскивания воды в цилиндр ( $\Theta = 20$  град ПКВ до ВМТ,  $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$ )

В таблице сравниваются индикаторные показатели базового четырёхтактного дизеля с показателями комбинированного шеститактного двигателя.

Применение комбинированного шеститактного рабочего цикла обеспечивает снижение дымности ОГ на 35 %, концентрации оксида углерода и углеводородов – на 50 %; оксидов азота – на 40%.

Сравнение индикаторных показатели двигателей

Тип двигателя	Базовый дизель	Шеститактный двигатель
Количество цилиндров	1	1
Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	120 × 125	120 × 125
Рабочий объем цилиндров, л	1,41	1,41
Степень сжатия	18,2	18,2
Инд. мощность, $N_i$ кВт	26	29
Ср. инд. давл, $p_i$ Мпа	0,85	1.39
Литр. инд. мощность, $p_{ш}$ кВт/л	18,18	20,30
Инд. КПД, $\eta_i$	0,44	0,59
Уд. инд. расход топлива, $g_i$ г/(кВт·ч)	175,2	116,8
Уд. инд. расход воды, $g_w$ кг/(кВт·ч)	-	1,11

На рис. 3. показана развернутая индикаторная диаграмма, полученная моделированием и подтвержденная экспериментально.

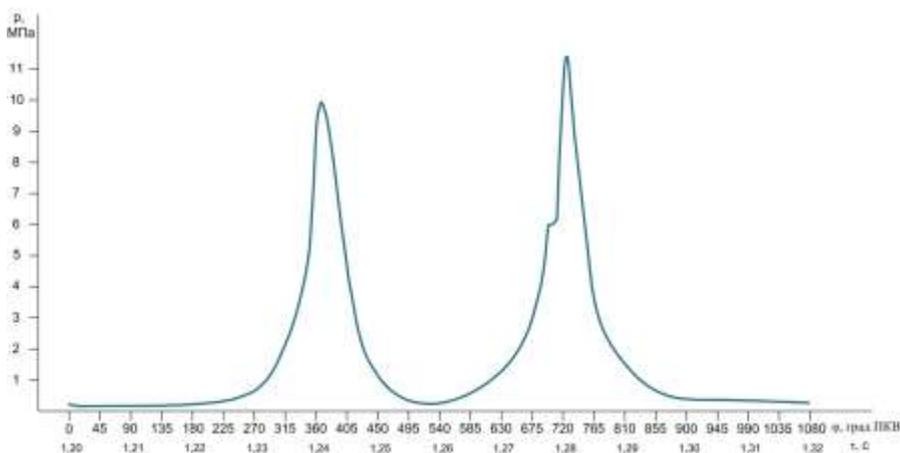


Рис. 3. Развернутая индикаторная диаграмма шеститактного двигателя, соответствующая соотношению параметров впрыскивания воды в цилиндр ( $p_{впр} = 23$  МПа;  $G_w = 0,63$  г за цикл;  $\Theta = 20$  град ПКВ до ВМТ;  $n=2600$  мин<sup>-1</sup>)

Полученные экспериментально на различных нагрузках значения дымности, концентрации в ОГ оксида углерода, углеводородов, оксидов азота в сравнении с показателями базового дизеля показаны на рис. 4.

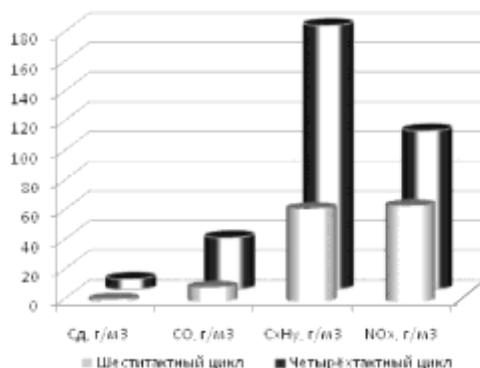


Рис. 4. Сравнительные показатели экологической безопасности двигателей с шеститактным и четырёхтактным циклом

Природа выявленных изменений подробно объяснена в материалах диссертации.

Необходимо отметить, что дополнительные окислительные процессы шеститактного цикла позволяют не допустить снижения мощности двигателя, при каких либо нарушениях основных процессов цикла (что обычно происходит в процессе эксплуатации и эксплуатационного износа двигателя), доокисление компенсирует ухудшение показателей первых трёх тактов и предотвращают увеличение токсичности ОГ двигателя.

В *приложении* приведены: общая математическая модель комбинированного цикла в среде MATLAB, блоки входящих в нее систем и подсистем, акты использования материалов диссертации.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана термодинамическая модель шеститактного рабочего цикла, теоретически оценена эффективность введения в рабочий цикл дополнительных тактов и подтверждена возможность более полного использования энергии топлива.

2. Разработана математическая модель рабочего цикла комбинированного шеститактного двигателя, решение которой реализовано в системе визуального проектирования SIMULINK пакета MATLAB. Сравнение математического и натурального экспериментов подтвердило адекватность модели с достоверностью не менее 95 %.

3. На базе четырёхтактного поршневого ДВС создан работоспособный одноцилиндровый двигатель, с системой для подачи в цилиндр воды, в котором реализован комбинированный шеститактный рабочий цикл.

4. Создана экспериментальная установка для исследования рабочего процесса шеститактного двигателя, которая позволила определять мощностные, экономические и экологические показатели в функции параметров впрыскивания воды.

5. Проведен натурный эксперимент на 27 режимах работы двигателя. Впервые получены индикаторные диаграммы комбинированного шеститактного двигателя. Найдены полиномиальные уравнения, адекватно (с достоверностью не менее 95 %) описывающие зависимость частоты вращения коленчатого вала ШД, показателя политропы процесса сжатия рабочего тела в нем, а также дымности и токсичности выбрасываемых из него газов от: давления, количества и момента начала впрыскивания воды в цилиндр.

6. Установлен (с помощью математического эксперимента) характер изменения индикаторной мощности, литровой индикаторной мощности, среднего индикаторного давления, индикаторного КПД, удельного индикаторного расхода топлива и удельного индикаторного расхода воды в зависимости от давления, количества и момента начала впрыскивания воды в цилиндр.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала максимальное среднее индикаторное давление достигается, если давление впрыскивания воды равно 23 МПа; впрыскивание начинается за 20 град ПКВ до ВМТ; цикловая подача воды составляет 0,63 г за цикл.

7. Проведенный при указанных значениях перечисленных факторов натурный эксперимент показал, что комбинированный шеститактный поршневой двигатель обеспечивает получение следующих индикаторных показателей: индикаторная мощность – 29 кВт; литровая индикаторная мощность – 20,30 кВт; среднее индикаторное давление – 1,39 МПа; индикаторный КПД – 0,59, удельный индикаторный расход топлива 116,8 г/(кВт·ч). Удельный индикаторный расход воды на этом режиме составляет 1,11 кг/(кВт·ч).

Таким образом, реализация шеститактного комбинированного рабочего цикла позволила повысить индикаторную мощность базового дизеля на 11,5 %, среднее индикаторное давление на 63,5%, индикаторный КПД на 34% и снизить удельный индикаторный расход топлива на 33,2%.

При этом происходит снижение дымности отработавших газов на 35 %, концентрации оксида углерода и углеводородов – на 50 %; оксидов азота – на 40%.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Быстров О.И. Шеститактный двигатель / О.И. Быстров // Повышение экологической безопасности автотракторной техники.- Барнаул: РАТ, АГТУ, 2006.-С. 102-107

2. Быстров О.И. Один из способов повышения эффективности ДВС / О.И. Быстров //«Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин»: Науч. вестник ЧВАИ. - Вып. № 19. - Челябинск, 2007. - С. 12-16.
3. Быстров О.И. Способ повышения экономичности и улучшения экологических свойств ДВС/ О.И. Быстров, В.С. Кукис // Транспорт Урала.-2007. -№3 .-С. 22-24
4. Быстров О.И. Проблемы и способы более полного использования термохимической энергии топлива ДВС (постановка проблемы) / О.И. Быстров // Повышение экологической безопасности автотракторной техники.- Барнаул: РАТ, АГТУ,2007.-С. 103-107
5. Быстров О.И. Проблемы и способы более полного использования термохимической энергии топлива ДВС (рабочий процесс шеститактного двигателя) / О.И. Быстров // Повышение экологической безопасности автотракторной техники.- Барнаул: РАТ, АГТУ,2007.-С. 108-120
6. Быстров О.И. Способ повышения экономичности и улучшения экологических свойств ДВС / О.И. Быстров // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. – Челябинск: ЧВВАКИУ, 2008. - С. 31-34.
7. Быстров О.И. Один из способов повышения эффективности ДВС / О.И. Быстров //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. - №2. - Новосибирск, 2008. - С.- 112-119.

Подписано к печати 17.11.2008.  
Формат 60x84 1/16. Объем 1,0 уч. -изд.л.  
Заказ № 577. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в типографии ГОУ ВПО ЧГПУ  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69