

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.43.03-621.43.2

ПИЛАТОВ
Александр Юрьевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОЗОНИРОВАНИЯ
СВЕЖЕГО ЗАРЯДА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель: **Вершина Георгий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе, экономической и финансовой деятельности Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Якубович Анатолий Иванович**, доктор технических наук, доцент;

Тимошук Александр Леонидович, кандидат технических наук, заведующий отделом энергетики РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

Оппонирующая организация: ОАО «Минский моторный завод»

Защита состоится 18 февраля 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании докторского совета по защите диссертаций Д 02.05.04 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел: (017)2938385, факс: (017) 2924683

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 12 января 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
канд. техн. наук, доцент

Ч.И. Жданович

©Пилатов А.Ю., 2011

©БНТУ, 2011

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений разрешения проблемы экономии энергоресурсов является дальнейший поиск путей качественного видоизменения характера термохимических рекомбинаций горения топлива в камере сгорания дизеля в целях повышения его технического уровня за счет средств совершенствования рабочего процесса и системы питания.

В этой связи, следует отметить, что доминантная роль в определении характера протекания рабочего процесса принадлежит закономерностям процесса сгорания топлива. Выявление новых факторов влияния на процесс сгорания топлива, например, таких как замена кислорода более сильным окислителем озоном в ее взаимосвязи с рабочим процессом, является одной из ключевых тем исследований альтернативных механизмов совершенствования рабочих процессов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема соответствует следующим направлениям научно-технической деятельности для Республики Беларусь, принятым Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований: тепло- и массоперенос в сложных системах, средах и веществах; теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с госбюджетной темой научных исследований, проводимых в Белорусском национальном техническом университете Государственной научно-технической программой «Тракторостроение» ГНТП «Машиностроение» по заданию АТ-05.30.04.04, по теме «Провести моделирование рабочего процесса дизеля (заключительный)», № ГР20071673

Диссертационная работа выполнялась также в рамках разработки учебных пособий и программных модулей по дисциплине «Теория двигателей внутреннего сгорания» (Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»).

Также работа является частью исследований, выполненных в рамках темы ГНУ Физико-технического института НАН Беларуси, НИР ГНП «Технология и оборудование машиностроения, задание 3.17» (Освоение в Республике Беларусь производства поршней с галерейным охлаждением и отказ от импорта продукции из-за рубежа, а также ремонта отечественных и импортных дизелей).

Цель и задачи исследования

Цель – обосновать применение озонирования свежего заряда на основании расчета параметров рабочего процесса дизельного двигателя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи исследования*:

-разработать термодинамический метод и математическую модель процесса сгорания дизеля, позволяющий моделировать влияние озона на технико-экономические (индикаторная мощность, индикаторный удельный расход топлива) и экологические (эмиссия сажи и оксидов азота) показатели с учетом формы камеры сгорания и пространственного расположения топливных факелов;

-определить эффективность озонирования свежего заряда на технико-экономические и экологические показатели рабочего процесса дизельного двигателя;

-разработать способ подачи озона в камеру сгорания дизеля с наддувом с учетом энергетических затрат на выработку необходимого количества озона;

-установить уровень концентрации озона на такте сжатия в цилиндре дизельного двигателя для выбранного типа конструкции озонатора с целью получения технико-экономического эффекта озонирования свежего заряда дизельного двигателя.

Объект исследования—тракторный четырехцилиндровый дизель 4ЧН 11/12,5 с турбонаддувом, оснащенный топливным насосом Motorpal PP4M10U1f-3486 ТУ 0789 (Чехия), турбокомпрессором С14–27 и имеющий следующие характеристики: номинальная мощность $N_e = 79$ кВт номинальная частота вращения $n = 2200$ мин⁻¹, максимальный крутящий момент $M_{e\max} = 342$ Н·м, частота вращения при максимальном крутящем моменте $n_{eM\max} = 1400$ мин⁻¹, удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме $g_e = 230$ г/кВт·ч.

Положения, выносимые на защиту:

– термодинамический метод и математическая модель расчета технико-экономических (индикаторная мощность N_i , удельный индикаторный расход топлива g_i), и экологических (эмиссия сажи, эмиссия оксидов азота NO_x) показателей при наличии озона в свежем заряде на основании полученной аналитической взаимосвязи температуры пламени в цилиндре дизеля с концентрацией активных центров тепловыделения с учетом формы камеры сгорания и пространственного расположения топливных факелов;

– методика определения влияния добавки озона на качественное изменение динамики активного тепловыделения в процессе сгорания и параметров рабочего процесса дизельного двигателя, на основании которой определена оптимальная концентрация $(0,8 - 1,0) \cdot 10^{-5}$ % озона в цилиндре по объему в свежем заряде для достижения расчетного уменьшения удельного индикаторного расхода топлива в пределах $(2 - 3)$ г/кВт·ч;

– метод расчета оптимальных энергетических затрат на выработку необходимой концентрации озона $(3,5 - 4,9) \cdot 10^{-5}$ % в системе питания воздухом для обеспечения оптимальной концентрации озона по объему в цилиндре $(0,8 - 1,0) \cdot 10^{-5}$ %;

– способ озонирования свежего заряда, на основании которого спроектирован экспериментальный озонатор, обеспечивающий концентрацию озона в свежем заряде $(3,5 - 4,9) \cdot 10^{-5}$ % при энергетических затратах 180 Вт;

– методика определения концентрации озона при испытаниях дизеля с наддувом, на основании которой определены концентрации озона $2,57 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ $\approx 4,49 \cdot 10^{-5}$ % в системе питания дизеля воздухом, а также концентрация озона в камере сгорания $4,0 \times 10^{-6}$ моль/м³ $\approx 0,88 \cdot 10^{-5}$ % обеспечивающая снижение удельного расхода топлива на 2,28 г/кВт·ч с учетом энергозатрат, а также дымности на 4,3%.

Личный вклад соискателя

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований разработана при участии научного руководителя.

Автором разработаны:

а) термодинамический метод и математическая модель расчета технико-экономических и экологических показателей при наличии озона в свежем заряде на основании полученной аналитической зависимости температуры пламени в цилиндре дизеля от концентрации активных центров тепловыделения с учетом формы камеры сгорания и пространственного расположения топливных факелов;

б) методика определения влияния добавки озона на качественное изменение динамики активного тепловыделения в процессе сгорания и параметров рабочего процесса дизеля, на основании которой определена оптимальная концентрация озона в цилиндре по объему в свежем заряде для достижения расчетного уменьшения удельного индикаторного расхода топлива в расчетных пределах;

в) метод расчета оптимальных энергетических затрат на выработку необходимой концентрации озона в системе питания воздухом для обеспечения оптимальной концентрации озона по объему в цилиндре;

г) способ озонирования свежего заряда, на основании которого спроектирован экспериментальный озонатор, обеспечивающий концентрацию озона в свежем заряде при определенных установленных энергетических затратах;

д) методика определения концентрации озона при испытаниях дизеля с наддувом, на основании которой определены концентрации озона в системе питания дизеля воздухом, обеспечивающие снижение удельного расхода топлива на 2,28 г/кВт·ч с учетом энергозатрат, а также дымности на 4,3 %.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, обсуждались на следующих научных собраниях: LXVI Научной конференции профессорско-преподавательского состава и структурных подразделений университета (Киев, Украина, 2009); XIII Международной научно-технической конференции «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы» (Севастополь, Украина, 2010); XII Международной научно-технической конференции «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы» (Севастополь, Украина, 2009); 5-й Международной научно-технической конференции «Наука образованию, производству, экономике» (Минск, 2008); 4-й Международной научно-технической конференции «Наука образованию, производству, экономике» (Минск, 2007);

конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2007).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах: 5 статьях в перечне изданий ВАК Беларуси, 5 изданиях ВАК Украины; 3 материалах конференций, 3 патентах на изобретение. Объем публикаций в изданиях, отвечающих требованиям ВАК, – 3,2 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Полный объем – 139 страниц, 51 иллюстрации на 13 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 5 приложений на 19 страницах, библиографический список в количестве 66 источников на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертационной работе под теоретическим обоснованием озонирования свежего заряда понимается моделирование технико-экономического и экологического эффекта применения озона в цилиндре дизельного двигателя на основе управляющего воздействия на динамику активного тепловыделения с последующим его экспериментальным определением.

В **первой главе** приводится анализ современных направлений исследований по совершенствованию дизельных двигателей и анализируются способы воздействия на рабочий процесс сгорания в дизельном двигателе высокоактивными химическими соединениями (радикалами, ионами и свободными атомами), дается анализ современных методов моделирования рабочего процесса высокофорсированных дизелей.

Теория воспламенения и горения углеводородов в двигателях внутреннего сгорания получила развитие в работах Н.Н. Семенова А.С. Соколика, А.Н. Воинова, Ю.Б. Свиридова. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования в работах Е.М. Степанова, Б.Г. Дьячкова, А. Эджертона и Дж. Паулинга, а также S.Nasser позволяют констатировать существенное влияние озона как окислителя углеводородов на процесс сгорания. Вопросам исследования, моделирования и оптимизации процесса горения топлива в его взаимосвязи с рабочим процессом посвящены работы Н.А. Иващенко, З.Р. Кавтарадзе, Г.М. Кухаренка, Е.А. Лазарева, Н.Ф. Разлейцева, Р.М. Петриченко и ряда других известных исследователей. Химизм реакций горения топлива с озоном впервые разработан Ю.Ю. Барышниковым совместно с А.С. Курниковым.

К наиболее актуальным с точки зрения повышения технического уровня дизелей показателям рабочего процесса относят экологические (оксиды азота NO_x , сажа) и технико-экономические (мощность, удельный расход топлива) показатели. При этом анализ современных методов воздействия на рабочий

процесс показал, что каждый метод воздействия на рабочий процесс порождает дополнительные эффекты, детальное выявление которых чрезвычайно затруднено в виду отсутствия комплексного описания физических процессов, происходящих в камере сгорания дизеля. В то же время, анализ экспериментальных работ фундаментального характера установил, что основное число данных, полученных путем экспериментов в рамках общих фундаментальных работ по исследованию озона на процесс горения, остаются противоречивыми.

Из проведенного анализа современных альтернативных методов можно сделать вывод о необходимости систематизации и теоретическом обосновании обнаруженных структурных изменений при протекании реакции горения, что должно быть основано на разработке уточненной модели рабочего процесса.

Анализ современных методов многомерного моделирования рабочего процесса установил, что основной сложностью в расчете параметров рабочего процесса при озонировании свежего заряда является многофакторное влияние их на технико-экономические и экологические показатели работы дизеля. В то же время, вопрос моделирования комплексного учета данного влияния в литературе освещен слабо. Обобщение полученных результатов позволило сформулировать цель работы, для достижения которой определены основные задачи теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе установлены физико-химические принципы расчета параметров рабочего процесса при введении озона в камеру сгорания, разработан термодинамический метод расчета параметров рабочего процесса дизеля на основе установленных физико-химических принципов.

Новым [1-А, 2-А, 3-А, 7-А] является подход к рассмотрению термодинамики (теплового баланса) межкапельного пространства. Он заключается в определении требуемого значения температуры пламени, для поддержания нужного термодинамического уровня для самовоспламенения и последующего распространения пламени по камере сгорания.

Разработанные принципы [1-А, 2-А, 3-А, 7-А] моделирования, а также описание [2-А] термодинамики цепной реакции с возможностью определения [4-А] граничных условий при решении задачи теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы основывается на существующей цепочно-тепловой теории горения.

Минимальный тепловой уровень (рисунок 1) характеризует температурой самовоспламенения (T_{II}), определяющей термодинамический потенциал *цепного* взрыва – баланс теплоты эндотермического поглощения q_{n-} для диссоциации молекул и экзотермической теплоты q_{n+} , которая выделяется в результате разложения альдегидов, формальдегидов и гидроперекисей.

Максимальный тепловой уровень, характеризующийся температурой воспламенения (T_{III}), определяет термодинамический баланс *теплового* взрыва – баланс теплоты q_+ , которая выделяется в пространство камеры сгорания в процессе горения, и теплоты q_- , которая уходит в окружающую среду во время тепловыделения q_+ .

Ввиду исключительной сложности термомеханического описания всех неразветвленных реакций самовоспламенения и разветвленных воспламенения и на их основе – моделирования постоянно изменяющихся температур T_{II} и T_{III} в ходе дальнейшего распространения для оценки теплового уровня межкапельного баланса (рисунок 1) предложен [1-А] эквивалентный уровень с температурой пламени T_{III}^* , тепловыделение которого эквивалентно некоторому реальному термохимическому процессу с учетом теплоты, уходящей в окружающую среду.

Данный температурный уровень T_{III}^* определяется с учетом установленных [3-А, 5-А] и подробно описанных в диссертационном исследовании основных термодинамических параметров термоконцентрационного баланса цепной реакции в камере сгорания для межкапельной теплопередачи по уравнению

$$Q_{изл} + Q_{конв} = \nu \cdot E_a + Q_{исп}, \quad (1)$$

где $Q_{изл}$ - энергия излучения, передающаяся к каплям, которые готовы к воспламенению в следующий момент времени от уже горящих капель на текущий момент; $Q_{конв}$ - энергия, передающаяся к каплям, которые готовы к воспламенению в следующий момент времени от уже горящих капель на текущий момент; $Q_{исп}$ - энергия процесса испарения, предшествующего воспламенению капель, которые воспламятся в следующий момент; ν - количество готовящихся к воспламенению капель; E_a - энергия активации воспламеняющихся капель.

При необходимости определения энергии активации воспламеняющихся капель с учетом введения озона в камеру сгорания предложена [10-А] формула

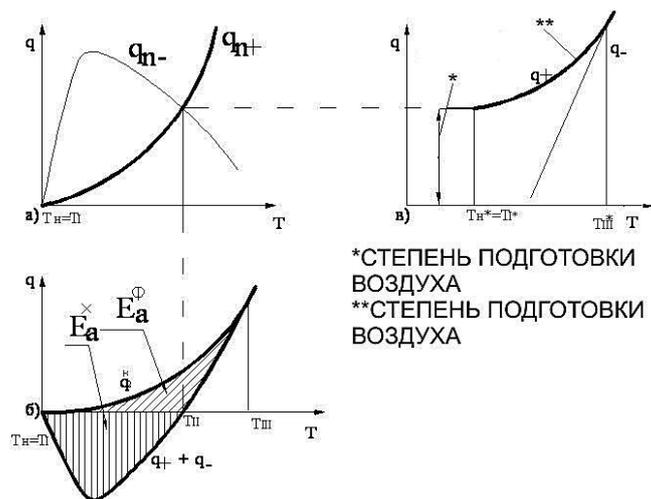
$$E'_a = E_a + \frac{\mu_{O_3}}{h\nu_{O_3}} h\nu_{cm} (E'_{O_3} - Q'_{O_3}), \quad (2)$$

где E_a - начальный уровень энергии активации, характеризующийся отсутствием дополнительного содержания высокоактивных частиц-радикалов в смеси; E'_{O_3} - энергия активации термического распада молекулы озона; Q'_{O_3} - экзотермический эффект реакции мономолекулярного распада озона; μ_{O_3} - мольная доля молекулярного озона в смеси; $h\nu_{O_3}$ - энергия связи в молекуле озона; $h\nu_{cm}$ - минимальное удельное энергетическое содержание, идущее в термодинамической системе на образование одного радикала в смеси.

Определены параметры [3-А] термоконцентрационного баланса цепной реакции в камере сгорания для межкапельной теплопередачи, среди которых **макропараметрический коэффициент генерации активных центров из капель топлива**

$$k = n_{обл} / n_{изл}, \quad (3)$$

где $n_{обл}$ - число капель топлива, оставшихся в камере сгорания; $n_{изл}$ - число горящих в данный момент капель.



а) тепловой баланс цепного взрыва; б) тепловой баланс процесса воспламенения дизельного топлива с учетом теплоотдачи в систему охлаждения дизеля; в) эквивалентный процесс воспламенения

Рисунок 1 – Термоконцентрационный баланс межкапельного пространства процесса сгорания для дизельного двигателя

Геометрический коэффициент облучаемости межкапельного пространства представляет отношение [3-А] потока излучения, проходящего через поверхность капли ко всей поверхности излучения

$$\varphi = (\pi \cdot d^2) / (4 \cdot \pi \cdot s^2) = (2 \cdot \bar{s})^2, \quad (4)$$

где \bar{s} – отношение межкапельного расстояния к диаметру капли; s – межкапельное расстояние; d – диаметр капли.

Для прогнозирования экологических характеристик (оксиды азота NO_x) предложена схема [3-А] задействованного в процессе активного тепловыделения кислорода воздуха с учетом [4-А, 6-А] изменяющихся пространственно-геометрических характеристик топливного факела. Расчет начальных концентраций азота и кислорода при определении средних равновесных концентраций NO_x по разработанному методу [3-А] произведен с учетом распределения массы рабочего тела с учетом его плотности между зонами камеры сгорания: турбулентной и общей.

Согласно разработанному методу количественный уровень NO_x определен как

$$C_{NO} = V \cdot \mu_{NO} \cdot 2 \cdot \frac{-(C_1 + C_2)K_c + \sqrt{(C_1 + C_2)^2 + 4(4 - K_c)K_c C_1 C_2}}{2(4 - K_c)}, \quad (5)$$

где V – объем цилиндра; μ_{NO} – молекулярная масса NO ; C_1 – начальная мольная концентрация азота на расчетном участке; C_2 – начальная мольная концентрация кислорода на расчетном участке; K_c – константа равновесия.

Средняя за цикл концентрация оценивается суммированием $C_{NO}(p(\varphi), T(\varphi))$ на каждом шаге интегрирования и делением общей суммы на продолжительность сгорания:

$$[\text{NO}]_{\text{цикл}} = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} C_{\text{NO}}(p(\varphi), T(\varphi)) d\varphi}{\varphi_z}, \quad (6)$$

где φ_1 – угол воспламенения топлива; φ_2 – угол окончания сгорания; φ_z – продолжительность сгорания.

Разработанный термодинамический метод [1-А, 2-А, 3-А, 4-А, 11-А] определяет уровень температуры $T(\varphi)$ и давления $p(\varphi)$ в камере сгорания, на основании которых с учетом ее конструктивных особенностей, режимов работы дизеля, геометрических характеристик траектории топливного факела [6-А, 10-А] производится определение равновесных концентраций оксидов азота $C_{\text{NO}}(p(\varphi), T(\varphi))$. Это может быть также использовано при оптимизации теплового состояния поршня [6-А].

В третьей главе смоделировано влияние добавки озона [7-А, 8-А], введенного в камеру сгорания, на показатели рабочего процесса дизеля с точки зрения качественных изменений динамики активного тепловыделения, на основании чего с учетом определенного уровня энергозатрат [9-А] рассчитана оптимальная концентрация озона в цилиндре дизельного двигателя, обеспечивающего уменьшение удельного индикаторного расхода топлива.

На основании проведенного структурного анализа разработанного термодинамического метода [3-А, 4-А, 5-А] получена формула для определения искомой температуры пламени, входящей в неявном виде в (1):

$$T_{\text{пл}} = \sqrt[4]{\frac{qT_{\text{пл}}^{\text{погл}} - qT_{\text{пл}}^{\text{конв}}}{qT_{\text{пл}}^{\text{изл}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{обл}}} + \frac{1}{k_{\text{обл}}} \cdot T_{\text{топл}}^4}, \quad (7)$$

где $qT_{\text{пл}}^{\text{погл}}$ – составляющая поглощения теплового потока; $qT_{\text{пл}}^{\text{конв}}$ – составляющая конвекции от теплового потока; $qT_{\text{пл}}^{\text{изл}}$ – составляющая излучения от теплового потока.

Смоделирована динамика тепловыделения (рисунок 2) в камере сгорания дизеля Д245С при различных углах опережения впрыска топлива 5 и 15 град. п.к.в. дизеля Д245С.

Определен [7-А] концентрационный уровень озона в цилиндре дизеля $(0,80 - 1,00) \cdot 10^{-5}$ моль/м³, наличие которого обуславливает качественные изменения процесса сгорания (рисунок 2), что обеспечивает расчетный технико-экономический эффект при $n = 1600$ мин⁻¹ (рисунок 3) с возможностью минимизации эмиссии NO_x (рисунок 4) и сажи (рисунок 5). Также определен по [7-А] необходимый уровень (до 25 Вт) активной мощности проектируемого озонатора, обеспечивающий при различных нагрузках при частоте вращения коленчатого вала $n = 1600$ мин⁻¹ (рисунок 6) минимальный необходимый уровень концентрации озона.

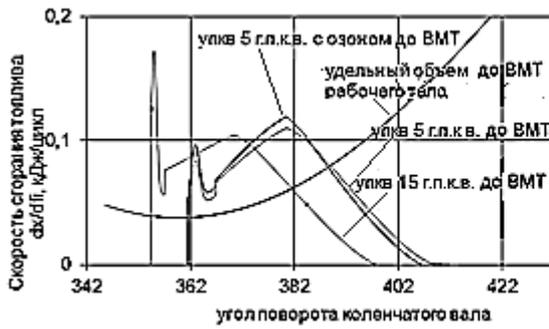


Рисунок 2-Динамика изменения скорости тепловыделения



Рисунок 3 – Моделирование удельного индикаторного расхода топлива

Обоснование расчетных технико-экономических и экологических результатов применения озона в камере сгорания дано [7-А, 8-А] с точки зрения общего сокращения периода задержки самовоспламенения и насыщения внутрицилиндрового пространства камеры сгорания высокоактивными химическими частицами. В результате происходит сокращение общей продолжительности сгорания за счет увеличения скорости тепловыделения на этапе после вспышки топлива



Рисунок 4 – Моделирование эмиссии - NOx при увеличении нагрузки дизеля



Рисунок 5 – Моделирование эмиссии сажи при увеличении нагрузки дизеля

При соотнесении результатов (рисунок 3, рисунок 4, рисунок 5) с критерием управляемости рабочего процесса (рисунок 7) выбран экспериментальный режим $N_e \approx 30 \text{ кВт}$, $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ для подтверждения установленной эффективности применения озона в камере сгорания (рисунок 8), в соответствии с которой прогнозный уровень озона в камере сгорания создан в пределах $(0,8 - 1,0) \cdot 10^{-5} \text{ моль/м}^3$ при установленных затратах активной мощности 22,33Вт.

В четвертой главе разработан способ [14-А] подачи озона в камеру сгорания через впускной тракт дизеля с наддувом с учетом определения [9-А] оптимальных энергетических затрат на выработку необходимого количества озона, на основании которого выбрана конструкция озонатора. Выбран линейный размер разрядного промежутка с точки зрения рекомендуемого оптимального соотношения его с давлением газа, определена площадь пластины разрядного промежутка S .

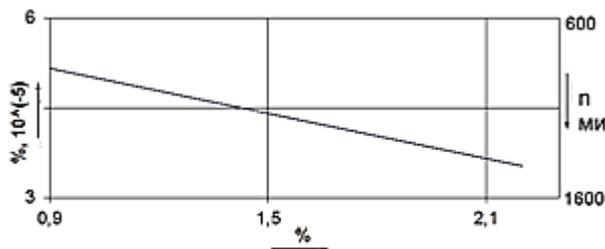


Рисунок 6-Моделирование концентрации озона в коллекторе

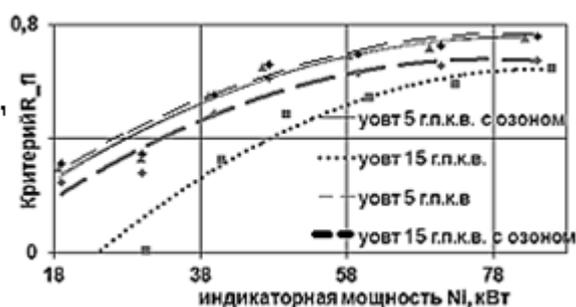


Рисунок 7 –Критерий управляемости рабочего процесса $R\phi$

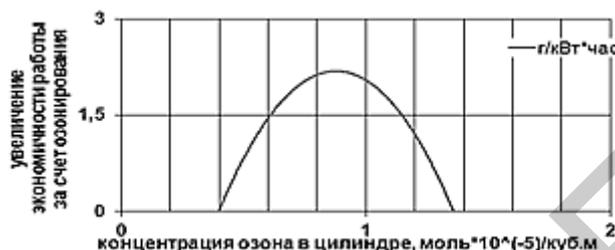


Рисунок 8 – Моделирование эффективности применения озонирования воздушного заряда

Установлено [7-А, 9-А], что условия насыщения свежего заряда озоном с учетом имеющейся специфики работы газодинамической системы дизеля с турбонаддувом отличны от атмосферных условий образования озона, а также генерации озона, в описанных в литературе способах установки озонаторов на бензиновые двигатели.

Предлагаемый способ [14-А] обработки впускного заряда в двигателе внутреннего сгорания путем добавления к горючей смеси озона в воздухе, полученного в разряде, заключается в том, что озон получают непосредственно перед воздушным коллектором двигателя в зоне разрядника на входе в турбокомпрессор в переменном электрическом поле.

Выбор конструктивных параметров озонатора осуществлен в рамках электрической теории озонаторов с учетом ВАХ озонатора, а также условий обеспечения необходимой концентрации озона в цилиндре дизеля с турбонаддувом.

Выбран линейный размер разрядного промежутка с точки зрения рекомендуемого оптимального соотношения его с давлением газа, определена площадь пластины разрядного промежутка S

$$S \leq \frac{(188/(U_{\text{пит}}k)) - (25/(E_{\text{кр}}d_rk))}{4fE_{\text{кр}}\epsilon_r\epsilon_0}, \quad (8)$$

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость газового промежутка; ϵ_0 – электрическая постоянная; d_r – линейный размер газового промежутка; k - число разрядных промежутков, в которых вырабатывается активная мощность, идущая в разряд; $E_{\text{кр}}$ – электрическая прочность газового промежутка; $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания.

Выбран линейный размер пластин разрядника, толщина диэлектрического барьера d_6 определена как

$$d_{\delta} \leq \frac{4f \varepsilon_{\delta} \varepsilon_0 S (U_r U_{\text{пит}} - U_r^2)}{\frac{P}{k} + \frac{4f \varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_r} U_r^2}, \quad (9)$$

где f – частота питания; U_r – напряжение горения разряда; P – активная мощность озонатора.

На основании разработанного способа (пат.12905 F 02M 27/04) [14-А] определены следующие конструктивные особенности озонатора (рисунок 9): напряжение питания озонатора 220В; напряжение на клеммах источника питания 7500В; частота тока питания 50 Гц; материал диэлектрика стекло М5 ГОСТ 11190; тип электродов плоские, стальные; активная мощность озонатора - 25 Вт; расчетная толщина разрядного промежутка 0,4 мм; площадь пластины/ширина 0,116м²/0,34м; толщина диэлектрического барьера 4^{0,2}_{-0,4} мм; число пластин озонатора 14.

На основании выбора конструктивных параметров проектируемого озонатора определены по электрической теории по электрической теории озонаторов значения расчетного тока через озонатор $I_{\text{ср}} = 26\text{мА}$ и величина полной мощности в цепи озонатора 180 Вт.

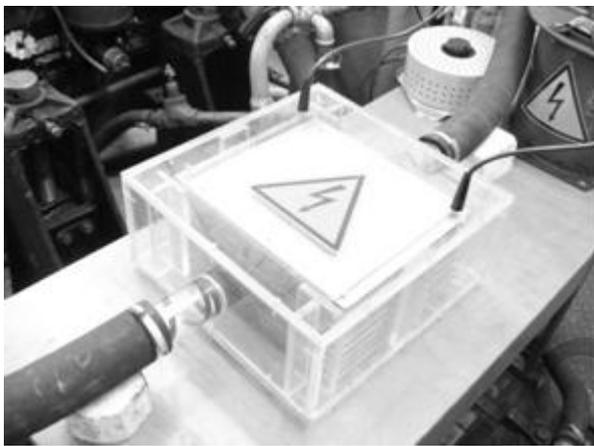


Рисунок 9 – Экспериментальный озонатор

также экспериментальное исследование показателей рабочего процесса дизеля.

Результатам экспериментальных исследований посвящена **пятая глава**. В пятой главе, описаны объект исследования и приборы для проведения испытаний, метод измерения концентрации озона при работе дизеля, а

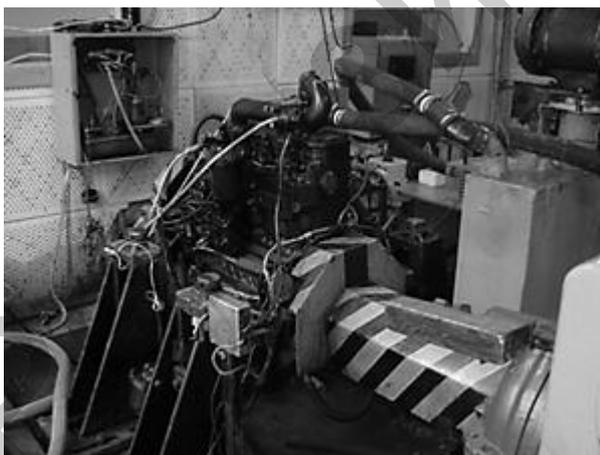


Рисунок 10 – Объект исследования

В качестве объекта исследования использовался тракторный дизель 4ЧН 11/12,5 на рисунке 10, с топливным насосом Motorpal PP4M10U1f-3486 ТУ 0789 (Чехия), турбокомпрессором С14–27.В процессе стационарных испытаний проводилась регистрация следующих параметров: M_k – крутящий момент двигателя; n – частота вращения коленчатого вала двигателя;

$t_{\text{сек}}$ – время расхода заданной дозы топлива; G_e – расход воздуха; T_r – температура отработавших газов; T_m – температура масла; $T_{\text{ж}}$ температура охлаждающей жидкости; p_m – давление масла; N_{O_3} – количество озона, прошедшего через

контрольный объем в единицу времени; P_k – давление в коллекторе после компрессора; T_k – температура после компрессора; p_o – атмосферное давление; T_o – температура окружающего воздуха; φ – влажность воздуха; N – дымность ОГ по абсолютной шкале.

Стационарные стендовые испытания проводились в два этапа: на режиме прокрутки с измерением концентрации озона в цилиндре и выпускном коллекторе за турбиной и режиме с $N_e \approx 29,43 \text{ кВт}$, $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ с измерением концентрации озона во впускном коллекторе.

Для осуществления экспериментальных исследований при регистрации параметров работы двигателя применялись следующие приборы, оборудование и измерительная аппаратура: тормозной стенд, включающий электрическую машину постоянного тока МПБ 32,7/28 ГОСТ 183-55 и весовое устройство ВКМ-57 для измерения и поддержания требуемой нагрузки на двигатель; тахометр цифровой-аналоговый ЦАТ-3М для измерения и контроля частоты вращения коленчатого вала; весовое устройство, для замера расхода топлива ВНЦ-2К ГОСТ 7327-55, оснащенное секундомером для измерения времени расхода заданной дозы топлива; расходомер воздуха РГ 400-1 ГОСТ 8700-65 для измерения расхода воздуха через двигатель. Опытными деталями и устройствами для измерений были колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2МК с измерением длины волны 340 нм (для измерения пропускаемого через измерительный объем 50 мл количества озона в потоке, проходящем за единицу времени); озонатор-ВП1 (экспериментальный); специальная форсунка для забора пробы воздушного заряда непосредственно из камеры сгорания; комплексная трансформаторная подстанция с номинальным напряжением на стороне высшего напряжения до 10 кВт; расходомеры для измерения объемного расхода озонозадушной смеси.

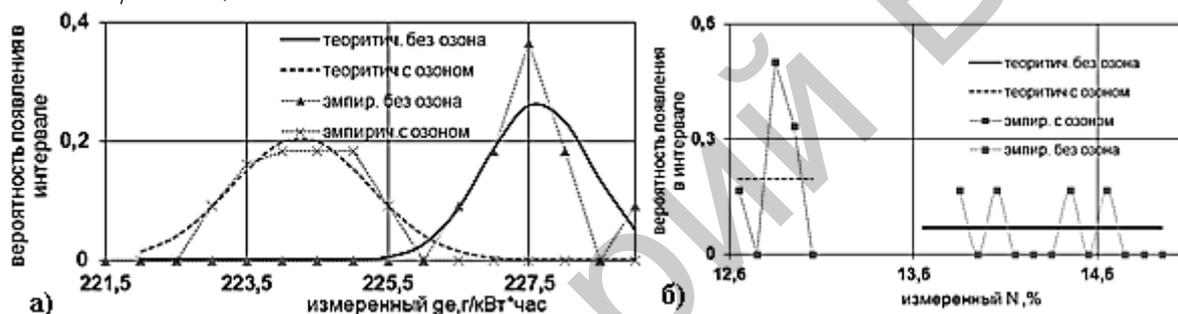
Измеряемое напряжение разрядного промежутка задается равным $U = 7,5 \text{ кВ}$. Измеренная сила тока составила $I = 24 \text{ мА}$. Потребляемая полная мощность озонатора составила $P_3 = UI = 180 \text{ Вт}$. Для измерения концентрации озона использовался исходный раствор 1% KJ в фосфатном буфере $pH = 6,3$. Точность измерения пропускаемого через измерительный объем количества озона составляет $0,0005 \text{ мкмоль/мин}$.

Требуемое число испытаний $n \geq 5$ определено с учетом предельной абсолютной погрешности приборов, заданной ГОСТ 18509-88, принятого коэффициента вариации, а также уровне надежности $\alpha = 0,95$. Измерения повторялись на выбранном режиме шесть раз с использованием электронного секундомера, а затем шесть раз без использования его в «ручном» режиме с предварительным определением массы топлива, при расходовании которой он срабатывает.

За время испытаний нагрузка и частота вращения дизеля поддерживались постоянными в пределах выбранного режима, соответствующего нагрузке $N_e = 29,43 \text{ кВт}$ измеренной с помощью весового устройства ВКМ-57 частоте вращения $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ измеренной тахометром ЦАТ-3М.

Статистический анализ измерений эффективного расхода топлива с включенным и выключенным озонатором позволил установить с надежностью $\alpha = 95\%$ наиболее вероятные значения (рисунок 11) удельного расхода топлива с выключенным озонатором $g_e = 227,65$ г/кВт·ч и $g_e = 224,00$ г/кВт·ч при включении озонатора для выбранного режима ездового цикла. В целях косвенного подтверждения изменений в характере процесса сгорания измерялась дымность отработавших газов.

Эффект снижения удельного эффективного расхода топлива без учета энергозатрат на озонирование составил $\Delta g_e = 3,64$ г/кВт·ч, с учетом энергозатрат $^m \Delta g_{e_{O_3}} = 2,28$ г/кВт·ч. Результат измерений (рисунок 11) дымности с выключенным озонатором в пределах $N = (13,7 - 14,3)$ % с включенным озонатором – $N = (12,6 - 13,1)$ %. Измеренная полная мощность 0,18 кВт озонатора обеспечивает молярные концентрации озона во впускном коллекторе $2,57 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ $\approx 4,49 \cdot 10^{-5}\%$; в цилиндре (в период предпламенных реакций) $4,0 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ $\approx 0,88 \cdot 10^{-5}\%$ в объеме.



а) обработка результатов измерений удельного эффективного расхода топлива; б) обработка результатов измерений дымности отработавших газов.

Рисунок 11 – Статистический анализ результатов измерений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан термодинамический метод [1-А, 2-А] и математическая модель [3-А, 11-А, 5-А] рабочего процесса дизельного двигателя, в соответствии с которыми на основании аналитической взаимосвязи температуры пламени в цилиндре дизельного двигателя с концентрацией активных центров тепловыделения расчетно установлено на режимах частичной нагрузки $N_e \approx 30$ кВт, $n = 1600$ мин⁻¹ уменьшение удельного индикаторного расхода топлива g_i в пределах (2–3) г/кВт·ч, а также уменьшение эмиссии сажевых частиц до 5% при озонировании свежего заряда на впуске в пределах $(3,5 - 4,9) \cdot 10^{-5}\%$ с учетом формы камеры сгорания дизельного двигателя и пространственного расположения топливных факелов при решении задачи [4-А, 6-А] снижения теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы.

2. Впервые определена [7-А] оптимальная концентрация озона $(0,8-1,0) \cdot 10^{-5}\%$ в цилиндре дизельного двигателя, влияние которой на динамику активного тепловыделения и параметры рабочего процесса [8-А] (мощность, удельный индикаторный расход топлива, эмиссия сажи и оксидов азота) обеспечивает расчетное уменьшение удельного индикаторного расхода топлива в пределах $(2-3)$ г/кВт·ч.

3. Разработан способ подачи [14-А] озона в камеру сгорания дизеля с турбонаддувом (Патент РБ № 12905 F 02M 27/04) с учетом [9-А] энергетических затрат 180Вт на выработку необходимого количества озона $2,57 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ $\approx 4,49 \cdot 10^{-5}\%$ во впускном коллекторе.

4. Впервые экспериментально подтвержден [10-А] концентрационный уровень озона $4,0 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ $\approx 0,88 \cdot 10^{-5}\%$ в камере сгорания дизеля на такте сжатия для выбранного типа конструкции озонатора, при котором установлено снижение удельного расхода топлива на 2,28 г/кВт·ч с учетом энергозатрат, а также дымности на 4,3%.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследования процесса сгорания с применением окислителей высокой химической активности, в частности озона, могут быть в настоящее время внедрены в учебный процесс по инновационным технологиям военных специальностей.

Результаты моделирования термодинамических процессов горения топлива в межкапельном пространстве топливного факела могут быть применены при определении граничных условий теплонапряженности цилиндропоршневой группы, а также снижения токсичности отработавших газов при решении перспективной задачи повышения технического уровня высокофорсированных дизелей.

Актуальность данного направления вытекает из задач освоения в Беларуси производства поршней с галерейным охлаждением и отказ от импорта продукции из-за рубежа, а также ремонта отечественных и импортных дизелей.

Практическую применимость и новизну направления повышения технического уровня высокофорсированных дизелей совершенствованием рабочего процесса озонированием на впуске воздушного заряда подтверждает патент [14-А,15-А]. Исходя из полученных результатов моделирования термодинамических параметров горения топлива в камере сгорания, экономически выгодно с точки зрения существенного снижения расхода топлива использовать озонирование на режимах частичной нагрузки на дизель. Озонирование в данном случае обеспечивает своевременную интенсификацию окислительно-восстановительных реакций горения топлива и минимизацию потерь в окружающую среду при рассеивании тепловой энергии в камере сгорания дизеля с турбонаддувом.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1-А Ноженко, Е.С. Прогнозирование энергии активации топлива на основе теории теплового взрыва/Е.С. Ноженко, А.Ю. Пилатов// Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту.-2009.-№3.-С.27-35.

2-А Могила, В.И. Кинетическое описание процесса горения в дизеле при озонировании топлива/ В.И. Могила, Е.С. Ноженко, А.Ю. Пилатов// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2009.- С.142-147

3-А Руктешель, О.С. Термодинамический метод расчета оксидов азота NO_x по температурному полю внутрицилиндрового пространства высокофорсированного дизеля/О.С. Руктешель, Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов//Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фізика-тэхн. навук.–2007.–№4.– С.43-54.

4-А Волочко, А.Т. Методика оптимизации рабочего процесса высокофорсированного дизеля при расчете теплонапряженного состояния поршня/ А.Т. Волочко, А.Ю. Изобелло, Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов//Механика машин, механизмов и материалов.–2009.–№2.–С.70-75.

5-А Куцко, Р.А. Моделирование неравномерности вращения коленчатого вала на основании расчета процесса сгорания многоцилиндрового дизельного двигателя/ Р.А. Куцко, А.Ю. Пилатов, Е.С. Тамкович//Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь. –2009. –№17. –С.110-117.

6-А Изобелло, А.Ю. Физическая модель оптимизации теплового состояния поршня высокофорсированного дизеля/ А.Ю. Изобелло, А.Ю. Пилатов//Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. –№1. – С.133-146.

7-А Пилатов, А.Ю. Теоретическое обоснование применения озона при организации управляемого процесса сгорания топлива в транспортных дизелях/А.Ю. Пилатов, Е.С. Ноженко// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – №6. –С.229-234.

8-А Пилатов, А.Ю. Прогнозирование параметров процесса сгорания при введении озона в камеру сгорания дизеля/ А.Ю. Пилатов// Международный научно-технический журнал «Локомотив-информ».–2010. –№5. –С.30-38.

9-А Вершина, Г.А., Пилатов, А.Ю. Определение энергетических затрат при озонировании воздушного заряда во впускном коллекторе дизеля/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов// Вестник БНТУ .–2008.–№2.–С.45-48.

10-А Вершина, Г.А. Исследование влияния озона на процесс сгорания в дизельном двигателе/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов, А.В. Матус, Н.И. Дроздова// Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фізика-тэхн. навук.–2009.–№2.–С.80-91.

Тезисы докладов на научных конференциях

11-А Вершина, Г.А., Пилатов А.Ю. Термодинамический метод расчета средних равновесных концентраций оксидов азота NO_x по температурному полю

внутрицилиндрового пространства высокофорсированного дизеля/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов//Сборник научных трудов по материалам международной конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, М.,2007.–С.412-417.

12-А Вершина, Г.А. Пилатов, А.Ю. Основные принципы оптимизации рабочего процесса дизельного двигателя/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов// Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию автотракторного факультета.– Минск,2006.–С.78-82.

13-А Вершина, Г.А. Пилатов, А.Ю. Применение окислителей высокой активности в рабочем процессе высокофорсированного дизеля/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов//Материалы Шестой международной научно-технической конференции «Наука- образованию, производству, экономике».–Минск, 2008.– С.255

Патенты и заявки на изобретения

14-А Способ обработки воздуха для горючей смеси в двигателе внутреннего сгорания и устройство для его осуществления: пат.12905 F 02M 27/04/ Г.А. Вершина, А.В. Матус, А.Ю. Пилатов; заявитель Белорусский национальный технический университет; заявл. 01.08.2010; опубл. 28.02.2010// Официальный бюл./ Национальный центр интеллектуальной собственности.- С.110.

15-А Турбокомпрессор с регулируемым давлением наддува: пат. 11115F02B51/00, F02C6/12 / Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов, Е.С. Тамкович; заявитель Белорусский национальный технический университет; заявл. 19.07.2006;опубл. 28.02.2008//Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2008.– №5.– С.115.

16-А Устройство для электризации топлива, подаваемого в камеру сгорания двигателя внутреннего сгорания: пат. 11705 F02M27/00/ Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов, Е.С. Тамкович; заявитель Белорусский национальный технический университет; заявл. 26.07.2006; опубл. 22.12.2008// Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2009.– №2.– С.101.

РЭЗІЮМЭ

Пілатаў Аляксандр Юр'евіч

Тэарэтычнае абгрунтаванне азанавання свежага зарада дызельнага рухавіка

Ключавыя словы: дызель, камера згарання, азон, параметры працоўнага рабочага, мадэляванне.

Мэта працы - абгрунтаваць ужыванне азону ў камеры згарання пры разліку параметраў працоўнага працэсу дызеля.

Метадалогія і метады праведзенага даследавання. Тэарэтычныя даследаванні праводзіліся на падставе законаў фізікі і тэрмадынамікі; эксперыментальныя даследаванні – па прыватных метадыках, распрацаваныя паводле агульнапрынятых метадыках; стэндавыя выпрабаванні – на падставе дзяржаўных стандартаў. Для апрацоўкі дасведчаных дадзеных выкарыстоўваліся стандартныя метадыкі і пакеты прыкладных праграм Mathematica 7 Excel 11.0. Пры правядзенні даследаванняў выкарыстоўваліся: электрычны тормаз сталага току *МПБ 32,7/28* ДАСТ 183-55 і вагавая прылада *ВКМ-57* № 1452, тахометр *ЦАТ-3М*, вагавая прылада *ВНЦ-2К* ДАСТ 7327-55 з электронным секундамерам, каларыметр фотаэлектрычны канцэнтрацыйны *КФК-2МК*, прыбор для вымярэння дымнасці СМОГ-1.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Прааналізаваны сучасныя кірункі даследаванняў па ўдасканаленню дызеляў, у тым ліку і альтэрнатыўныя спосабы ўздзеяння на працоўны працэс актыўнымі хімічнымі злучэннямі, распрацаваны тэрмадынамічны метады разліку параметраў рабочага працэсу дызеля з улікам магчымасці прагназавання параметраў працоўнага працэсу пры ўводзінах азону ў камеру згарання, а таксама магчымасці вызначэння межавых умоў пры рашэнні задачы цепланаспружаннасці дэталей цыліндрапаршневой групы, смадэляваны ўплыў азону на дынаміку актыўнага цеплавывлучэння і ўсталявана эфектыўнасць азанавання камеры згарання, распрацаваны спосаб падачы азону ў камеру згарання і вымераны яго ўзровень. Навізна прапанаваных тэхнічных рашэнняў пацверджана патэнтамі на вынаходства ВУ № 20070957 12905, ВУ 11115 №20060748 2008г. і ВУ 11705 №20060777 2008г.

Ступень выкарыстання. Вынікі тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў скарыстаны кафедрай аўтамабільнай тэхнікі УО «Ваенная Акадэмія Рэспублікі Беларусь» для распрацоўкі навучальных дапаможнікаў і праграмных модуляў па дысцыпліне тэорыя рухавіка ўнутранага згарання, а таксама ГНУ «Фізіка-тэхнічны інстытут НАН Беларусі» для падвышэння тэхнічнага ўзроўня высокафорсіраваных дызеляў пры разліку межавых умоў цепланаспружаннасці цыліндрапаршневой групы і зніжэнні таксічнасці адпрацаваных газаў, распрацаваны метады разліку энергетычных выдаткаў пры выпрацоўцы азону і метадыка вызначэння яго канцэнтрацыі.

Вобласць ужывання: УО «Ваенная акадэмія Рэспублікі Беларусь, ГНУ «Фізіка-тэхнічны інстытут НАН Беларусі».

РЕЗЮМЕ

Пилатов Александр Юрьевич

Теоретическое обоснование озонирования свежего заряда дизельного двигателя

Ключевые слова: дизель, камера сгорания, озон, параметры рабочего процесса, моделирование.

Цель работы – обосновать применение озонирования свежего заряда на основании расчета параметров рабочего процесса дизельного двигателя.

Методология и методы проведенного исследования. Теоретические исследования проводились на основе законов физики и термодинамики; экспериментальные исследования – по частным методикам, разработанным согласно общепринятым методикам; стендовые испытания – на основе государственных стандартов. Для обработки опытных данных использовались стандартные статистические методики и пакеты прикладных программ Mathematica 7 Excel 11.0. При проведении исследований использовались: электрический тормоз постоянного тока МПБ 32,7/28 ГОСТ 183– 55 и весовое устройство ВКМ-57 № 1452, тахометр ЦАТ-3М, весовое устройство ВНЦ-2К ГОСТ 7327– 55 с электронным секундомером, колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2МК, прибор для измерения дымности СМОГ-1.

Полученные результаты и их новизна. Проанализированы современные направления исследований по совершенствованию дизелей, в том числе и альтернативные способы воздействия на рабочий процесс высокоактивными химическими соединениями, разработан термодинамический метод расчета параметров рабочего процесса дизеля, с учетом возможности прогнозирования параметров рабочего процесса при введении озона в камеру сгорания, а также возможности определения граничных условий при решении задачи теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы, смоделировано влияние озона на динамику активного тепловыделения и установлена эффективность озонирования камеры сгорания, разработан способ подачи озона в камеру сгорания и измерен его уровень. Новизна предлагаемых технических решений подтверждена патентами на изобретение ВУ № 20070957 12905, ВУ 11115 №20060748 2008г. и ВУ 11705 №20060777 2008г.

Степень использования. Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы кафедрой автомобильной техники УО «Военная Академия РБ» для разработки учебных пособий и программных модулей по дисциплине «теория двигателя внутреннего сгорания», а также ГНУ Физико-технический институт НАН Беларуси для повышения технического уровня высокофорсированных дизелей при расчете граничных условий теплонапряженности цилиндропоршневой группы и снижения токсичности отработавших газов, разработан метод расчета энергетических затрат при выработке озона и методика определения его концентрации.

Область применения: УО «Военная академия РБ», ГНУ «Физико-технический институт НАН Республики Беларусь»

SUMMARY

Pilatau Aliaksandr

A theoretical justification of ozonization of diesel air-charge

Key words: diesel engine, the combustion chamber, ozone, working parameters of the process, simulation.

Objective - to prove the use of ozone in the combustion chamber prediction of the parameters of the engine.

Methodology and methods of the study. Theoretical studies, investigations were carried out based on the laws of physics and thermodynamics, experimental studies on private-techniques developed in accordance with standard techniques, bench tests - based on state standards. For processing the experimental data used in the standard statistically methods and software packages Mathematica 7 Excel 11.0. The studies were used: electric brake in constant current BCH 32,7 / 28 GOST 183-55 and weighing device VKM-57 number 1452, tachometer TSAT-3M, weighing machine VNC-2K GOST 7327-55 from the electronic stopwatch, photoelectric colorimeter KFK-concentration 2MK instrument for measuring the opacity SMOG-1.

The results and their novelty. Analyzed the current trends of research on improving diesel engines, including those for alternative ways of influencing high-level workflow is the chemical compounds developed by the thermodynamic method of calculation of parameters of the engine, with the possibility of predicting the parameters of the workflow with the introduction of ozone into the combustion chamber as well as the possibility of determining the boundary conditions in solving the problem heat voltage parts cylinder group, predicted impact of ozone on the dynamics of the active heat and the efficacy of ozonation of the combustion chamber, developed a method of application of ozone in the cell chamber and measured its level. The novelty of the proposed technical solutions confirmed by patents for invention BY № 20070957 12905, BY 11115 number 20060748 2008 and BY 11705 number 20060777 2008.

The degree of use. The results of theoretical and experimental studies used motor vehicles department UO "Military Academy of Belarus" for the development of training manuals and software modules for the discipline of "theory of the internal combustion engine, as well as SSI Physico-Technical Institute of NAS of Belarus to improve the technical level, high boosted diesels in the calculation of boundary conditions heat voltage in whole cylinder groups and reduce the toxicity of exhaust of gases, developed a method for calculating the energy costs in the development of ozone and method for determining its concentration.

Application: WO "Military Academy of Belarus, SSI Physico-Technical Institute of NAS of Belarus.

Научное издание

Пилатов Александр Юрьевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОЗОНИРОВАНИЯ СВЕЖЕГО
ЗАРЯДА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.04.02 –Тепловые двигатели

Подписано в печать __.01.2011
Гарнитура «Таймс».Уч.-изд. л. 1,08
Формат 60x84 1/16.Отпечатано на ризографе.
Тираж 60. Бумага офсетная.Усл. печ. л. 1,28;Заказ ____

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет
ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.
220013, Минск, пр-т Независимости, 65.