

КОНТРОЛЬ ВЫБРОСОВ NO_x В МОЩНЫХ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПО ДАВЛЕНИЮ В ЦИЛИНДРЕ (материалы конгресса СИМАС 2010)

Soeren Sofke, Joachim Eggers, Martin Greve; AVAT Automation GmbH, Германия

В этом разделе вниманию читателей предлагается один из докладов Конгресса СИМАС-2010, который посвящен методу контроля выбросов NO_x по записи диаграммы давления в цилиндре.

Запись и расшифровка подобных процессов на серийных двигателях стали возможными относительно недавно, благодаря созданию датчиков давления, способных длительное время выдерживать экстремальные условия работы камеры сгорания, а также программных и аппаратных средств, способных обрабатывать эту информацию в реальном времени. Идея использовать сигнал давления для контроля выбросов NO_x не нова, однако авторам удалось продвинуться достаточно далеко в ее развитии, показав принципиальную возможность промышленного внедрения. При этом существующие системы обработки сигнала давления могут быть дополнены новой функцией, что избавляет от необходимости использовать отдельный датчик NO_x для контроля выбросов в эксплуатации.

Ввиду важности темы мы публикуем перевод доклада практически целиком, с незначительными техническими сокращениями. Перевод доклада выполнен Г. Мельником.

Технико-экономические показатели крупного газового двигателя в значительной степени зависят от качества применяемой системы регулирования. При этом особенно перспективным является использование датчика давления для постоянного мониторинга состояния двигателя и организации замкнутого контура регулирования процесса сгорания в каждом цилиндре. Это позволяет обеспечить надежное обнаружение детонации и пропуска вспышек, а также выравнивание по цилиндрам различных параметров процесса сгорания, в том числе средней индикаторной мощности, максимального давления цикла, фазировки и длительности сгорания. Это значит, что теперь можно использовать двигатель с наибольшей эффективностью, максимально ограничив запретные зоны за счет точного регулирования с помощью новейших технологий обработки цифровых сигналов в реальном времени. При этом улучшаются показатели работы двигателя, возрастает его мощность и повышается надежность. Вместе с тем следует признать, что в серийных двигателях возможности, открываемые применением датчиков давления в цилиндре, сегодня используются лишь в малой степени.

На 6-й конференции по газовым двигателям в 2009 г. в Дессау была представлена замкнутая система регулирования по давлению в цилиндре, в принципе пригодная для использования на любом действующем газовом двигателе. Затем были значительно продвинуты конструкция датчика давления в цилиндре и блок регулирования, осуществляющие, помимо повышения мощности и КПД двигателя, принципиально новые функции.

В настоящем докладе предлагается концепция использования сигнала давления в цилиндре для контроля выбросов NO_x . Это может быть дополнительной функцией уже существующих систем измерения давления в цилиндре, которая позволит отказаться от приобретения специальных датчиков NO_x , либо, если такие датчики уже имеются, заменить их более эффективной системой. Более подробно суть данного метода, его возможности и преимущества рассмотрены ниже. Основываясь на теоретических аспектах формирования NO_x , предложенных Я.Б. Зельдовичем, мы прежде всего попытались сформулировать общее понимание основных положений, описывающих влияние температуры на скорость формирования NO_x . На основе этой теории было выполнено моделирование, с помощью которого оценивалось влияние второстепенных факторов на формирование NO_x , и были предложены два возможных эмпирических подхода к созданию системы контроля NO_x на этой основе. Для их оценки были проведены сравнительные испытания на лабораторном одноцилиндровом отсеке, работавшем в широком диапазоне режимов. Точность и достоверность результатов проведенного экспериментального исследования подтвердили предположения о целесообразности использования указанных методов для надежной оценки выбросов NO_x на серийных двигателях.

Внедрение контроля выбросов NO_x по давлению в цилиндре во всем диапазоне рабочих режимов позволит преодолеть характерные недостатки существующих способов, основанных на ряде не всегда бесспорных допущений, и требующих периодической калибровки двигателя с учетом применяемого топлива. С точки зрения достижения компромисса между выбросами NO_x и экономичностью следует отметить, что по-

вышение точности определения NO_x позволит уменьшить коэффициенты запаса и тем самым повысить КПД двигателя.

1. Введение

Ужесточение экологического законодательства приводит к постоянному снижению предельно допустимых выбросов окислов азота (NO_x) для ДВС. Речь идет не только о международных стандартах, таких, как например, IMO Marpol Annex VI, US EPA Tier 4 и соответственно EU IV TA-Luft/2, но и о многочисленных национальных стандартах, а также нормативных документах, реализуемых в масштабах отдельных проектов. Поэтому способы контроля NO_x на предмет соответствия упомянутым нормативам должны были быть внедрены уже более 10 лет назад. В целом можно сказать, что при проектировании и модернизации двигателей приоритетными задачами являются повышение технико-экономических показателей двигателей с учетом условий существующих и новых применений, в том числе удельной мощности, теплового и механического КПД, динамических характеристик, а также возможностей гибкого приспособления к меняющимся внешним условиям, таким как разброс качества топлива и диапазон изменения температуры окружающего воздуха. Вместо увеличения числа датчиков и усложнения измерительной аппаратуры мы предлагаем новый подход, заключающийся в использовании записи давления в цилиндре для контроля работы двигателя. Известно, что сигнал давления в цилиндре, в сочетании с достаточно точным измерением угла поворота коленчатого вала, является важнейшим источником информации для вычисления таких параметров, как среднее индикаторное давление (ИМЕР), p_{max} (максимальное давление в цилиндре), фазы зажигания, фазировка и длительность процесса сгорания, контроля наличия детонации и пропусков вспышек.

Логично было бы попытаться расширить этот перечень, добавив к нему контроль выбросов NO_x . Наибольший интерес представляет концепция контроля выбросов NO_x на основании сигнала давления в цилиндре, которая как будет показано далее, рассчитана на внедрение этой идеи на некоторых конкретных моделях двигателей. При этом необходимо решить две задачи, которые будут решаться последовательно:

➤ создание системы контроля NO_x на основании сигнала давления в цилиндре, которая по точности определения NO_x как минимум не будет уступать лучшим из существующих мировых аналогов, что позволит ей заменить существующие системы, получив экономический эффект за счет сокращения разнообразия и упрощения используемой аппаратуры;

➤ создание системы контроля NO_x , превосходящей лучшие из существующих аналогов, особенно по такому показателю, как устойчивость к переменным внешним воздействиям и к жестким ограничениям на выброс NO_x .

Обсуждаемая идея в технической литературе упоминалась неоднократно. При этом подчеркивалось ее основное преимущество — возможность получения более детальной информации о процессе сгорания в каждом цилиндре с высоким разрешением по температуре. Остановимся на этом более подробно.

Корреляция между параметрами процесса сгорания и формированием NO_x исследовалась методами математического моделирования. В итоге были получены две эмпирические модели контроля NO_x по давлению в цилиндре, подтвержденные результатами натурных испытаний. Однако общность этих моделей еще предстоит проверить путем испытаний на реальных двигателях в широком диапазоне рабочих режимов. В качестве первого примера рассматривается опытный двигатель с искровым и форкамерным зажиганием. Другие, более сложные случаи применения метода, например, на двигателе с самовоспламенением от сжатия (дизеле), подробно не рассматриваются, так как выходят за рамки настоящего исследования.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 разбираются существующие методы контроля NO_x , их преимущества и недостатки. В разделе 3 рассматриваются общие вопросы формирования NO_x , и, в частности, влияние температуры на интенсивность этого процесса. В разделе 4 исследуется зависимость между процессами сгорания и формирования NO_x с целью нахождения функциональных зависимостей и построения эмпирических моделей. В разделе 5 описана проверка этих моделей на реальном двигателе с целью оценки их адекватности. Наконец, в разделе 6 приведены выводы и сформулированы направления дальнейших исследований.

2. Обзор существующих методов контроля NO_x

Рассмотрим современные методы контроля NO_x , в первую очередь, с точки зрения необходимых для этого сигналов. Большинство из них требует измерений параметров процессов в камере сгорания или на ее выходе, а один метод использует только измерение входных параметров сгорания. Объективная оценка эффективности различных методов применительно к серийным двигателям в задачи настоящего доклада не входит, а рассматриваются лишь их принципиальные преимущества и недостатки.

Ниже перечислены методы, которыми, согласно литературным данным (например, Mollenhauer

или Zacharias) пользуются некоторые известные производители газовых двигателей.

➤ Технология LEANOX фирмы Jenbacher основана на измерении давления и температуры воздуха на входе, по результатам измерения которых вычисляется подводимая тепловая энергия. При стехиометрическом значении коэффициента избытка воздуха λ существует корреляция между подводимой тепловой энергией и величиной выбросов NO_x . Это означает возможность контроля выбросов NO_x путем регистрации некоторых параметров процесса сгорания. Данный подход дает хорошие результаты только при условии, что процесс сгорания соответствует ожидаемому при данных значениях входных параметров.

➤ Фирма MWM практикует измерение температуры на входе в цилиндр с помощью термопары, по результатам которого вычисляется средняя температура в камере сгорания. Для определенных точек установившегося режима с помощью тарировки устанавливается соответствие между этой средней температурой и величиной выбросов NO_x , зависящей от нагрузки. Преимущество этой технологии состоит в том, что она опирается на параметры реального процесса сгорания, в частности, на температуру сгорания, от которой главным образом и зависит формирование NO_x .

➤ Фирма Caterpillar использует измерение ионного тока. Согласно этому методу определяется угол поворота коленвала, соответствующий времени прохождения фронта факела от свечи зажигания к датчику ионного тока. Этот угол сопоставляется определенной величине выбросов NO_x по заданной характеристике, которая, в свою очередь, зависит от режима работы двигателя. В этом случае, как и в предыдущем, используются параметры реального процесса сгорания, что следует считать определенным преимуществом, хотя в данном случае связь между измеряемой величиной и результатом не столь непосредственна, как в случае прямого измерения температуры.

➤ Имеется метод, аналогичный технологии MWM, который предусматривает измерение температуры, но не в цилиндрах, а на выходе каждого цилиндра. Однако при высоких значениях температуры в цилиндре, влияющей на образование NO_x , этот метод менее репрезентативен, а упомянутый способ измерения температуры следует считать скорее косвенным.

➤ Существует еще один метод, применяемый преимущественно в двигателях с небольшим числом цилиндров и предполагающий стабильность частоты вращения двигателя. Его основная идея состоит в контроле стабильности процесса

сгорания по косвенному показателю стехиометрического коэффициента избытка воздуха, который может быть сопоставлен с определенным уровнем выбросов NO_x , если внешние условия хорошо известны.

Помимо перечисленных выше методов контроля выбросов NO_x , нашедших применение на серийных машинах, известны и другие методы. Весьма интересной представляется идея «датчика реального содержания NO_x », такого, например, как «smart NO_x sensor» для автомобильный двигателей, предлагаемый фирмой NGK. Однако в силу ряда конструктивных причин такие датчики на газовых двигателях применения пока не нашли. При всей их привлекательности все же следует отметить, что измерение давления в цилиндре является более универсальным методом, обеспечивающим одновременный контроль нескольких параметров без дополнительных датчиков.

3. Теория образования NO_x в ДВС

В этом разделе рассматриваются теоретические основы формирования NO_x при сгорании газообразного топлива. Особое внимание при этом уделено влиянию температуры на формирование NO_x .

Стадии этого процесса схематически представлены на рис. 1. Входными переменными алгоритма процесса являются давление в цилиндре и соответствующая ему скорость тепловыделения (которая также может быть включена в модель рабочего процесса). Любая из этих двух переменных может быть преобразована в другую методами анализа сгорания или расчета рабочего процесса, с учетом других параметров двигателя. В данной работе этот принцип используется для модели-

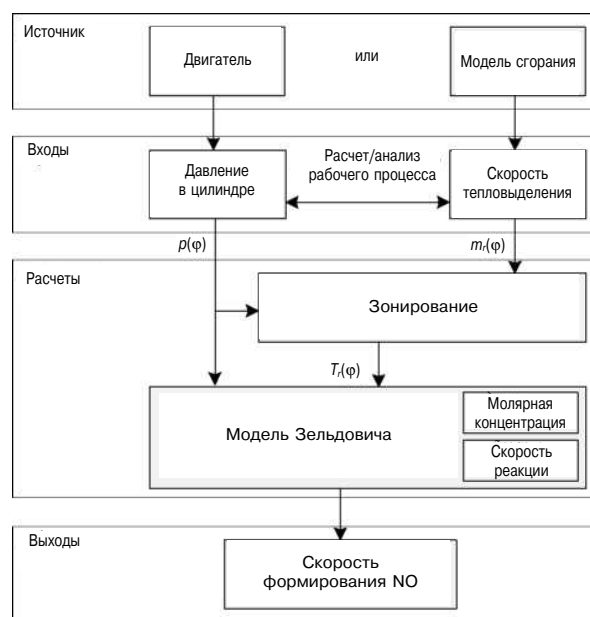


Рис. 1. Блок-схема расчета процесса образования окислов азота

рования скорости образования NO_x , чтобы получить надежные эмпирические выражения для расчета выхода NO_x (раздел 4), и для проверки теоретической модели расчета выхода NO_x с использованием записи давления в цилиндре реального одноцилиндрового двигателя на стенде (см. раздел 5). Далее NO_x формируется в так называемой зоне реакции за фронтом факела согласно механизму, описанному Зельдовичем, поэтому нам понадобится значение локальной температуры в зоне реакции, для чего используется зональная модель.

3.1. Типичный состав NO_x

Окислы азота (NO_x), содержащиеся в ОГ ДВС, состоят из следующих основных компонентов: окись азота (NO), двуокись азота (NO_2) и закись азота (N_2O). Наибольшая часть суммы окислов (порядка 90 %) приходится на долю NO . Различают три главных источника образования NO :

- Термическая NO образуется, согласно известной схеме Зельдовича, за счет окисления азота воздуха при высокой (более 1600 К) температуре. Это основной источник образования NO при сжигании природного газа.

- Мгновенная NO образуется в небольших количествах внутри факела при температуре порядка 1000 К в ходе реакции Фенимора.

- Топливная NO образуется из азота, содержащегося в топливе, в виде, например, NH_3 . При сжигании природного газа количество топливной NO обычно равно нулю.

Таким образом, основную часть выбросов NO_x при работе ДВС на природном газе составляет термическая NO . Рассмотрим расчет выхода термической NO и его зависимость от входных параметров, таких как молярная концентрация исходных компонентов, коэффициент скорости реакции и температура в различных зонах реакции.

3.2. Зональная модель

Чтобы рассчитать скорость образования NO для данного состава смеси при данном значении давления в цилиндре, нужно знать локальную температуру в зоне реакции. К сожалению, определить эту температуру с достаточной точностью отнюдь не просто, особенно если речь идет о расчетах с использованием сигнала по давлению в цилиндре в реальном времени. Для этого требуется практическая и достаточно корректная модель расчета.

В литературе можно найти различные методы расчета температуры в зоне реакции T_r . Существует множество зональных моделей, и выбрать из них оптимальную достаточно сложно. В сущности, все рассмотренные модели имеют в своей основе один и тот же принцип зонирования. В настоящей работе выбрана модель Хайдера [Heider].

Эта модель основана на эмпирическом разделении текущего объема цилиндра, зависящего от угла ПКВ, на зону несгоревшего топлива и зону реакции, разделенные фронтом пламени. Разность температур между зонами в течение периода от момента начала сгорания (SoC — Start-of-Combustion) и до момента открытия выпускного клапана (vo — outlet valve opening) определяется следующим образом:

$$T_r(\varphi) - T_u(\varphi) = B(\varphi)A. \quad (1)$$

Здесь B — так называемая функция теплопередачи, а A — начальная разность температур в момент SoC . Параметр A используется для настройки функции теплопередачи таким образом, чтобы при расчетной температуре в зоне реакции вычисление давало бы правильное значение NO . Параметр A обычно подбирается для конкретного типа двигателя. Модель Хайдера в принципе основана на следующих постулатах:

- до начала сгорания смесь является однородной;
- до начала сгорания температура в обеих зонах одинакова;
- в процессе сгорания давление в цилиндре одинаково в обеих зонах;
- общий объем цилиндра равен сумме объемов обеих зон;
- общая масса в цилиндре равна сумме масс в обеих зонах;
- скорость тепловыделения считается известной, при этом конвективный теплообмен в расчет не принимается;
- образование NO происходит только в зоне реакции.

С учетом этих допущений, эмпирически определена следующая функция теплопередачи:

$$B(\varphi) = 1 - \frac{\int_{\text{SoC}}^{\varphi} [p(\varphi) - p_0(\varphi)] m_r(\varphi) d\varphi}{\int_{\text{SoC}}^{\text{vo}} [p(\varphi) - p_0(\varphi)] m_r(\varphi) d\varphi}, \quad (2)$$

с помощью которой коэффициент m_r может быть выведен из скорости тепловыделения, которая, в свою очередь, вычисляется на основании анализа графика изменения давления в цилиндре.

И наконец, температура в данной зоне T_r находится из уравнения (1) с учетом уравнении состояния идеального газа $pV = mRT$:

$$T_r(\varphi) = \frac{p(\varphi)V(\varphi) + m_r(\varphi) R_r(\varphi) B(\varphi)A}{m_u(\varphi) R_u(\varphi) + m_r(\varphi) R_r(\varphi)}. \quad (3)$$

В качестве примеров на рис. 2 и 3 показаны графики изменения давления и температуры в цилиндре, полученные из расчета по модели Хайдера.

Здесь нульмерная температура $T_{0-\text{dim}}$ рассчитана в предположении адиабатического сжатия с начальными условиями, существующими в камере сгорания в момент закрытия выпускных клапанов.

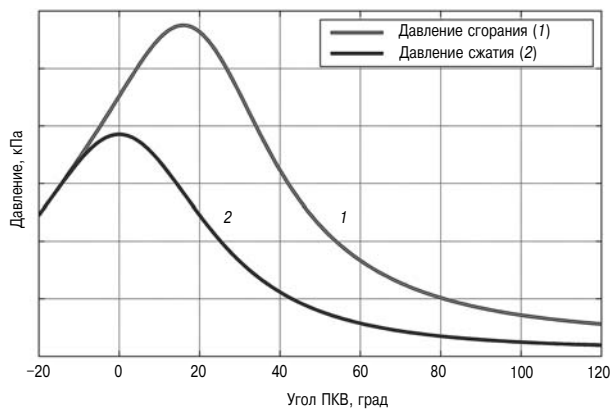


Рис. 2. График изменения давления в цилиндре

В начале сгорания начинается процесс разделения на зоны (зонирования), при этом температура в зоне реакции T_r быстро растет. Последующее турбулентное смешение масс из обеих зон приводит к выравниванию температур. К концу сгорания зона несгоревшего топлива прекращает свое существование (см. кривую 3 для температуры T_u), а температура в зоне реакции T_r становится равной T_{0-dim} .

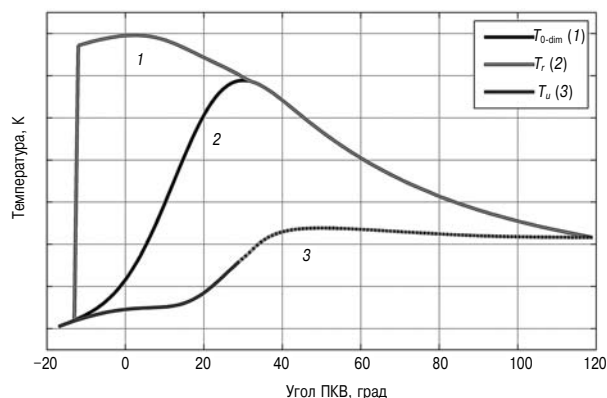
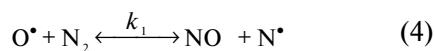


Рис. 3. Температуры в зонах реакции и несгоревшего топлива, а также нульмерная температура

3.3. Термическая NO

Схема реакции образования термической NO была предложена Зельдовичем и в дальнейшем была расширена Vaulch. Расширенная схема состоит из трех элементарных реакций, протекающих за фронтом факела в зоне реакции.



Поскольку элементарные реакции (4–6) протекают очень медленно (работает неравновесный кинетический механизм), следует рассматривать их константы скорости k_i . Константа скорости $k(T_r)$ зависит от температуры (см. также раз-

дел 3.2) и может быть выражена эмпирическим уравнением Аррениуса:

$$k(T_r) = A_p \exp(-E_a / RT_r) \quad (7)$$

Некоторые авторы предложили коэффициенты для уравнения Аррениуса, найденные экспериментальным путем. В настоящей работе используются коэффициенты, предложенные Patts.

3.3.1. Скорости образования термической NO

В уравнениях (4–6) предполагается квазистационарный характер молярной концентрации N, которая может быть вычислена следующим образом:

$$[N] = \frac{k_{1f}[O][N_2] + k_{2b}[NO][O] + k_{3b}[NO][H]}{k_{1b}[NO] + k_{2f}[O_2] + k_{3f}[OH]} \quad (8)$$

Преобразуя выражения (4–6) с учетом уравнения (8), получаем уравнение скорости образования NO:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O][N_2] - 2k_{1b}[NO][N] \quad (9)$$

И наконец, для определения молярного содержания NO за фронтом факела для рассматриваемого рабочего цикла нужно проинтегрировать скорость образования NO (уравнение (9)) на временном интервале от момента зажигания до момента открытия выпускных клапанов.

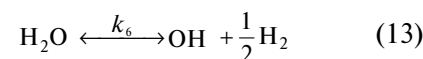
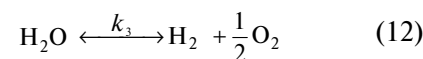
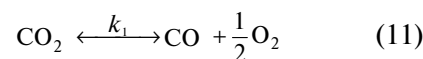
3.3.2. Определение молярной концентрации

Для решения уравнений (8) и (9) необходимо определить молярную концентрацию компонентов O_2 , N_2 и OH , а также радикалов O и H в зоне реакции. Для этого решается система нелинейных уравнений, выражающих три закона физики. Поскольку некоторые вычисления включают величины давления, следует вспомнить, что парциальное давление p_μ и молярная концентрация $[\mu]$ связаны между собой следующим соотношением:

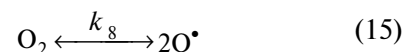
$$[\mu] = p_\mu / RT_r \quad (10)$$

Здесь используются следующие три уравнения, отражающие базовые физические законы:

(i) Закон действующих масс определяет состав системы ОНС, образующейся после реакций горения топлива.



Далее, используем два уравнения диссоциации O_2 и H_2 :



В отличие от элементарных реакций (4–6), реакции (11–15) являются мгновенными (работает механизм термодинамического равновесия), в результате чего возникает частичное равновесие. В данном случае прямая и обратная реакции протекают с одинаковой скоростью, например:

$$\frac{k_{4f}}{k_{4b}} = \frac{[\text{CO}][\text{O}_2]^{1.5}}{[\text{CO}_2]} - K_{C4} = \text{const.} \quad (16)$$

(ii) При сгорании углеводородного топлива произвольного состава $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ в воздухе (21 % кислорода и 79 % азота) атомные отношения Z выражаются следующим образом:

$$\zeta = 2\lambda(x + y/4 - z/2). \quad (17)$$

Доли атомов O, H, C и N определяют состав топлива, и в процессе сгорания они не меняются:

$$\frac{N_O}{N_N} = \frac{z + \zeta}{(79/21)\lambda} = \text{const.} \quad (18)$$

$$\frac{N_O}{N_C} = \frac{z + \zeta}{x} = \text{const.} \quad (19)$$

$$\frac{N_H}{N_C} = \frac{y}{x} = \text{const.}, \quad (20)$$

где

$$N_O = 2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{OH}} \quad (21)$$

$$N_N = 2p_{\text{N}_2} \quad (22)$$

$$N_C = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} \quad (23)$$

$$N_H = 2p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}}. \quad (24)$$

(iii) Согласно закону Дальтона, давление в цилиндре p равно сумме парциальных давлений компонентов газовой смеси p_M :

$$p = \sum p_i. \quad (25)$$

Затем используем нелинейное уравнение [19] для решения семи уравнений (11–13), (18–20) и (25), чтобы определить молярную концентрацию отдельных компонентов. Диссоциация радикалов O и H (14, 15) может быть рассчитана на следующей стадии, чтобы упростить анализ нелинейной системы. Такое упрощение, согласно

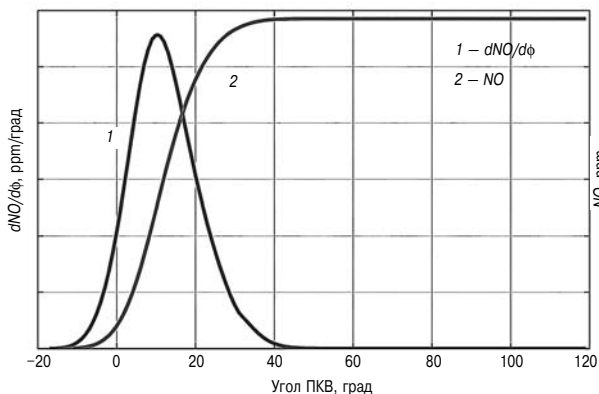


Рис. 4. Скорость образования и общая концентрация термической NO при сгорании

ряду источников, на конечный результат не влияет. Таким образом, для уравнения (9) могут быть найдены молярные концентрации всех компонентов в зоне реакции, участвующих в образовании термической NO.

И наконец, общий выброс термической NO в течение рабочего цикла может быть вычислен интегрированием скорости образования NO до момента открытия выпускных клапанов. На рис. 4 приведены результаты расчета скорости образования NO и концентрации NO, соответствующие индикаторному давлению, приведенному на рис. 2.

Алгоритм приближенного вычисления скорости образования NO на основе расчета скорости образования термической NO учитывает только основные механизмы реакции, поэтому принимая во внимание целый ряд принятых упрощений, можно считать, что общий характер процесса образования NO_x установлен. Итак, основными факторами в процессе образования NO_x являются:

- > локальная концентрация азота и кислорода в смеси;
- > скорость реакции, зависящая от локальной температуры.

Предложенная теоретическая модель образования NO_x может стать основой для более глубокого понимания механизма образования NO_x . Она будет использована для моделирования процесса сгорания, чтобы получить более точные и более широкие представления о корреляции между давлением в цилиндре и характером образования NO_x .

4. Моделирование процесса образования NO_x как часть моделирования работы двигателя

В этом разделе рассматриваются параметры рабочего процесса двигателя с точки зрения их влияния на образование выбросов NO_x , основанные на результатах моделирования. При этом ставилась задача оценки влияния этих факторов на образование NO_x с целью создания системы контроля выбросов NO_x по сигналу давления в цилиндре. Выполненный в ходе данной работы анализ изменения давления в цилиндре позволяет рассчитать для серийных двигателей нульмерную температуру $T_{0\text{-dim}}$ и такие показатели рабочего процесса, как точки начала сгорания (SoC), середины сгорания (CoC) и конца сгорания (EoC). Это значит, что в создаваемой системе контроля NO_x по измеряемому давлению в цилиндре удобнее всего использовать именно эти параметры. Данный анализ можно считать примером, позволяющим проверить достоверность и надежность предложенного метода контроля NO_x по указанным параметрам.

Для этого было выполнено моделирование рабочих процессов двигателей, а для расчетов вы-

бросов NO_x была использована описанная в разделе 3 теоретическая модель.

4.1. Модель сгорания

Согласно литературным источникам, все известные модели рабочего процесса можно разбить на три группы: (i) эмпирические модели, (ii) феноменологические модели и (iii) CFD модели, основанные на методах вычислительной газодинамики. В этой работе использована эмпирическая модель, а скорость тепловыделения задается функцией Вибе. На рис. 5 представлен пример графиков скорости тепловыделения и изменения массовой доли сгоревшего топлива, вычисленных по функции Вибе.

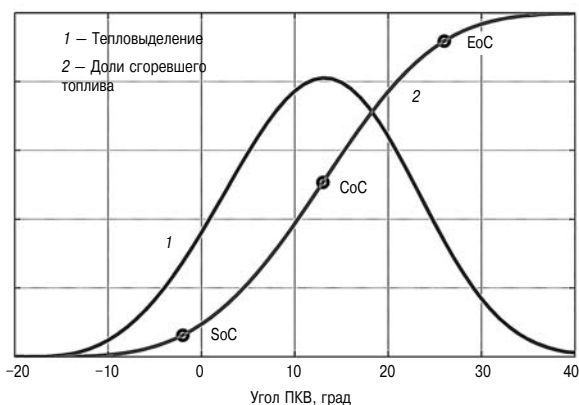


Рис. 5. Тепловыделение и массовые доли сгоревшего топлива в начале (SoC), в середине (CoC) и в конце (EoC) сгорания

В дальнейшем при моделировании показателей рабочего процесса двигателя используются упомянутые выше характеристические значения SoC, CoC, и EoC, означающие углы поворота коленчатого вала (ПКВ), при которых доля сгоревшего топлива составляет 5, 50, и 90 % соответственно. При этом длительность процесса сгорания вычисляется как $\text{DoC} = \text{EoC} - \text{SoC}$.

Выбор функции Вибе обусловлен ее простотой, но необходимую точность она обеспечивает только в случае открытой камеры сгорания. Рабочий процесс форкамерного двигателя достаточно адекватно может быть описан лишь с помощью более продвинутых эмпирических моделей типа двойной функции Вибе, или, еще лучше, с помощью феноменологических либо CFD моделей.

Скорость тепловыделения, заданная при моделировании, наряду с некоторыми другими рабочими параметрами, такими как, например, требуемая величина IMEP, используются для вычисления давления в цилиндре по всему рабочему ходу поршня (см. рис. 2).

4.2. Анализ изменения параметров рабочего процесса

Одним из главных преимуществ моделирования образования NO_x при сгорании является возмож-

ность исследовать характер изменения отдельных параметров рабочего процесса с большой точностью. Аналогичное исследование на натурной модели является задачей несравненно более трудной, если вообще выполнимой. Рассмотрим несколько возможных сценариев. Моделирование скорости образования NO_x и нульмерной температуры проводится для следующих случаев:

- варьируется только положение середины процесса сгорания при неизменной его длительности, т. е. $[\text{NO}_x] = f(\text{CoC}), \text{DoC} = \text{const}$;

- варьируется только продолжительность сгорания при постоянном положении начала сгорания, т. е. $[\text{NO}_x] = f(\text{DoC}), \text{SoC} = \text{const}$, и наконец,

- варьируется только длительность сгорания при постоянном положении середины сгорания, т. е. $[\text{NO}_x] = f(\text{DoC}), \text{CoC} = \text{const}$.

Ниже описаны полученные при моделировании функциональные зависимости, относящиеся к скорости образования NO_x , переменным рабочего процесса и нульмерной температуре $T_{0\text{-dim}}$ соответственно.

4.2.1. $[\text{NO}_x] = f(\text{CoC}), \text{DoC} = \text{const}$

Положение середины процесса сгорания обычно очень хорошо коррелирует с термическим КПД, а именно при прочих равных условиях сдвиг CoC по ходу угла ПКВ приводит к снижению теплового КПД. С учетом этого факта изменение образования NO_x (рис. 6) иллюстрирует известную дилемму — снижение выбросов или повышение КПД. Более позднее сгорание ведет к снижению теплового КПД и одновременно — к снижению выбросов NO_x . Более раннее сгорание, напротив, ведет к увеличению выбросов NO_x . Этот эффект имеет вполне очевидное объяснение: раннее сгорание связано с повышением давления в цилиндре и, следовательно, максимальной температуры сгорания, что приводит к увеличению выбросов NO_x .

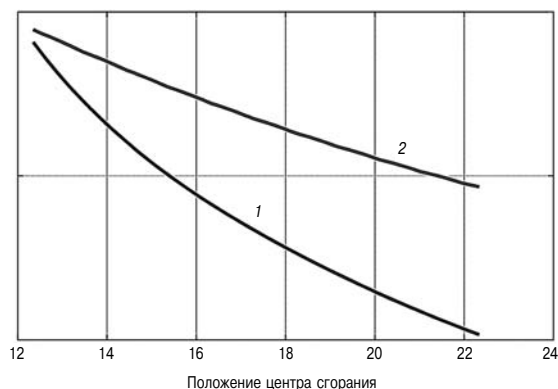


Рис. 6. Чувствительность скорости образования NO_x (1) и $T_{0\text{-dim}}$ (2) к вариациям положения центра сгорания при постоянной длительности сгорания ($\text{DoC} = 28$ град)

4.2.2. $[NO_x] = f(CoC), DoC = const$

Длительность сгорания зависит, главным образом, от коэффициента избытка воздуха, тогда как начало сгорания в большой степени зависит от угла зажигания. Хотя на практике обе эти зависимости в определенной мере связаны друг с другом, данный сценарий характерен для наиболее современных газовых двигателей, в которых выбросы регулируются за счет изменения коэффициента избытка воздуха при фиксированной величине угла зажигания, за исключением ситуаций, когда работает система контроля детонации. При работе на особо бедной смеси ожидается увеличение длительности сгорания, тогда как на богатой смеси продолжительность сгорания сокращается. Эти ожидания подтверждаются результатами моделирования (рис. 7). Очевидно, что сокращение длительности сгорания приводит к ускорению тепловыделения, что ведет к повышению пиковой температуры сгорания, увеличивая тем самым количество NO_x . К сожалению, это означает, что для снижения выбросов NO_x нужно сдвигать центр сгорания «вперед», примирившись с соответствующим увеличением расхода топлива.

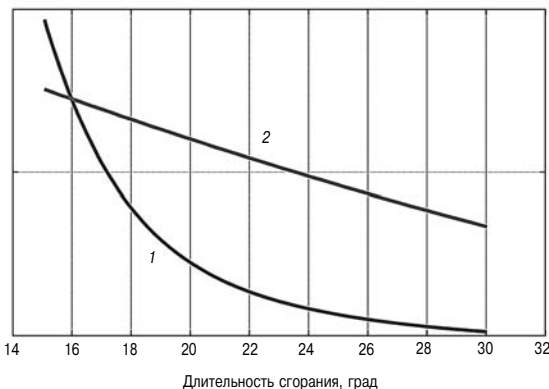


Рис. 7. Чувствительность скорости образования NO_x (1) и $T_{0=dim}$ (2) к вариациям длительности сгорания при постоянном положении начала сгорания ($SoC = 28$ град)

4.2.3. $[NO_x] = f(DoC), CoC = const$

Рассмотрим вариант, когда положение середины процесса сгорания сохраняется постоянным, с тем, чтобы значение теплового КПД тоже сохранялось более или менее постоянным. Это означает, что для изменения длительности сгорания нужно будет согласованно менять положения начала и конца сгорания. В результате получено (рис. 8), что увеличение длительности сгорания за счет, например, обеднения смеси в общем случае приводит к снижению выбросов NO_x . Однако при достижении определенной длительности сгорания дальнейшее снижение выбросов NO_x будет незначительным. Иначе говоря, имеется известный резерв для

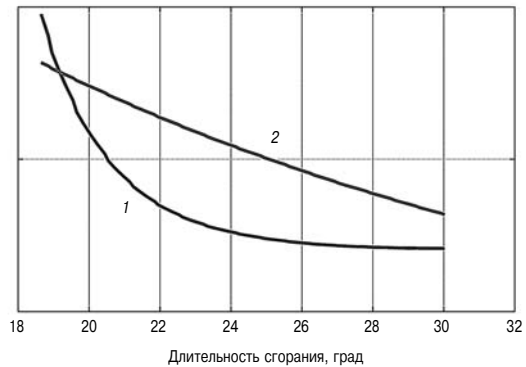


Рис. 8. Чувствительность скорости образования NO_x (1) и $T_{0=dim}$ (2) к вариациям длительности сгорания при постоянном положении центра сгорания ($CoC = 15$ град)

снижения выбросов NO_x без уменьшения термического КПД, однако начиная с некоторого момента, сдвиг середины сгорания «вперед» становится неизбежным.

В трудах конференции 2009 г. в Дессау, посвященной газовым двигателям, описывается подобный эксперимент на реальном двигателе. Этот двигатель работал полностью под управлением разработанной авторами системы, измеряющей давление в цилиндре. Увеличение DoC обеспечило снижение выбросов NO_x , что соответствует результатам моделирования (см. рис. 8).

Полученные средствами моделирования зависимости между параметрами рабочего процесса и ожидаемым уровнями выбросов NO_x выглядят достаточно реалистично. Аналогично, были подтверждены ожидаемые результаты в части нульмерных температур $T_{0, dim}$.

Рассмотренные функциональные зависимости являются обратимыми, что позволяет рассчитать и контролировать выбросы NO_x , оценив скорость тепловыделения по ее характеристическим параметрам SoC , CoC и DoC или по нульмерной температуре $T_{0, dim}$.

5. Оценка эффективности метода

Этот раздел посвящен оценке эффективности предложенного метода по результатам натурального эксперимента. При этом использована теоретическая модель образования NO_x , описанная в разделе 3, эмпирические модели процессов скорости тепловыделения и нульмерной температуры, описанные в разделе 4. Для проверки достоверности этих моделей был использован репрезентативный массив данных, полученный в ходе натурального эксперимента.

5.1. Условия проведения испытаний

Массив экспериментальных данных включает индикаторные диаграммы примерно по 250 точкам установившихся режимов и некоторого количества переходных процессов. Этот массив создавался с целью накопления достаточного

объема надежных исходных данных для текущих и будущих исследований. Он был уже успешно использован для проверки электроники, регистрирующей давление в цилиндре в реальном времени, а в рамках настоящей работы используется для проверки предложенного метода контроля выбросов NO_x .

Стендовый двигатель. Одноцилиндровый отсек для опытов был предоставлен подразделением Института ДВС (LVK) Мюнхенского технического университета. Он представляет собой дизель типа MTU-396, несколько лет назад переоборудованный в газовый двигатель с искровым зажиганием. Этот двигатель и испытательный стенд на его базе особенно удобны тем, что на нем можно легко проверить различные методы зажигания и организации рабочего процесса на разных газовых смесях. Основные технические характеристики стенда приведены в табл. 1.

Методы зажигания. Были испробованы три метода зажигания, а именно: свеча зажигания в открытой камере, свеча зажигания в форкамере и, наконец, форкамера с отдельной подачей газа.

Для каждого метода зажигания варьировался ряд рабочих параметров двигателя, а именно, состав газовой смеси, фаза зажигания, коэффициент избытка воздуха, противодавление на выпуске, давление и температура воздушного заряда, а также мощность и частота вращения.

Измерение давления. Для измерения давления в цилиндре использовались различные типы пьезоэлектрических датчиков. На установившихся режимах использовалась аппаратура LVK, а на переходных режимах использовался сигнал от собственной аппаратуры AVAT, которая управляла двигателем в переходных процессах. Помимо давления в цилиндре записывались также другие необходимые параметры, в первую очередь — значения выбросов NO_x , измеряемые с помощью самой современной аппаратуры лаборатории FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy). Надо отметить, что измерения NO_x производились асинхронно, т. е. имело место запаздывание по времени из-за дистанции между пространством цилиндра и датчиком.

Таблица 1

**Технические характеристики
опытного газового двигателя
на базе отсека MTU 396**

Диаметр цилиндра	74 мм
Рабочий объем	3,96 дм ³
Ход поршня	185 мм
Степень сжатия	11,7
Номинальная частота вращения	1500 об/мин

Метод анализа. Перед анализом данных установленных режимов производилось усреднение результатов записи 100 последовательных индикаторных диаграмм. Эта процедура представляется не бесспорной, принимая во внимание нелинейный характер зависимости между температурой в цилиндре и уровнем выбросов NO_x . Тем не менее, учитывая значительные флуктуации, свойственные рабочему процессу двигателя с искровым зажиганием, а также запаздывание в измерительном тракте, усреднение записей давления в цилиндре неизбежно.

5.2. Критерии оценки

Для установления зависимости между величиной X , являющейся функцией давления в цилиндре, и измеренной величиной выбросов NO_x (координата Y) используется коэффициент корреляции R :

$$R(X, Y) = \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sqrt{\text{Var}(X)}\sqrt{\text{Var}(Y)}}. \quad (26)$$

Когда ожидаемая зависимость между X и Y носит экспоненциальный характер (сравним рис. 6, 7 и 8), величина Y откладывается в логарифмическом масштабе:

$$R_{\text{exp}}(X, Y) = R(X, \log Y). \quad (27)$$

При высокой степени корреляции коэффициент R может быть использован для вывода зависимости между величиной X и измеренной величиной выбросов NO_x с помощью инвертирования линии регрессии. Тогда точность корреляции между измеренной величиной выбросов NO_x и расчетной величиной выбросов NO_x (\check{Y}) выражается средней относительной ошибкой, e_{mr} выраженной в процентах:

$$e_{mr}(Y, \check{Y}) = \frac{1}{n} \sum_n \frac{|\check{Y} - Y|}{Y} 100 \%. \quad (28)$$

5.3. Оценка выбросов NO_x на основе модели Хайдера и механизма Зельдовича

Чтобы оценить выбросы NO_x , описанная выше теоретическая модель образования NO_x была применена к записям изменения давления на нескольких рабочих режимах. Диаграмма разброса экспериментальных данных (рис. 9) построена по результатам, полученным при испытаниях варианта двигателя со свечой зажигания в открытой камере.

Линия регрессии показывает хорошее соответствие между расчетной и измеренной величинами выбросов NO_x , при этом коэффициент корреляции $R = 0,92$, а средняя относительная погрешность расчета $e_{mr} = 23,3 \%$. Аналогичные результаты, полученные на двигателе с форкамерой — с искровым зажиганием и с подводом газа в форкамеру — приведены в табл. 2.

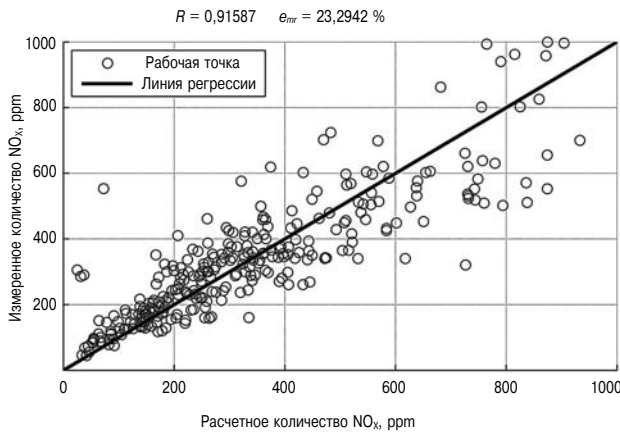


Рис. 9. Расчетное (ось X) и измеренное (ось Y) количество NO_x для открытой камеры сгорания (расчет выполнен по модели Хайдера/Зельдовича)

5.4. Оценка выбросов NO_x на основе анализа скорости тепловыделения

Чтобы оценить выбросы NO_x по давлению в цилиндре, можно использовать параметры рабочего процесса, полученные из анализа скорости тепловыделения, используя полученную при моделировании функциональную зависимость между ними, как показано в разделе 4.2. Учитывая погрешности в определении температуры сжигаемого газа, полученная зависимость должна корректироваться по результатам измерений на двигателях данного типа. Сочетание теоретического обоснования с измерением реальных параметров гарантирует робастность предлагаемого метода при его применении на серийных двигателях, что исключает его чрезмерную зависимость от типа двигателя или конкретного массива экспериментальных данных.

На рис. 10 показана зависимость (ожидаемо экспоненциальная) между измеренными значениями выбросов NO_x, и их значениями, рассчитанными по скорости тепловыделения. По ней можно определить выбросы NO_x с относительной ошибкой расчета $e_{mr} = 15,3\%$ и коэффициентом корреляции $R_{exp} = -0,96$ для открытой камеры сгорания. Величины относительной ошибки и

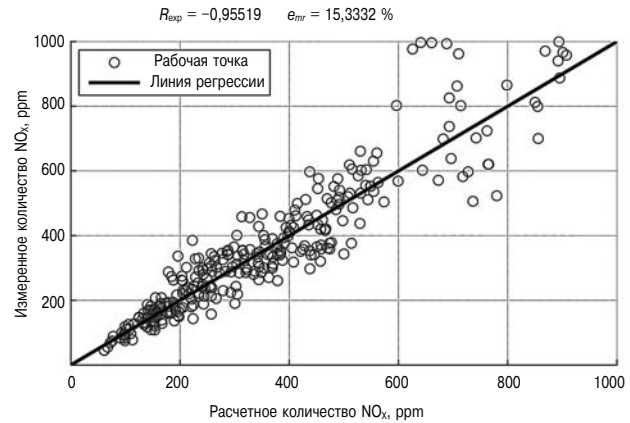


Рис. 10. Расчетное (ось X) и измеренное (ось Y) количество NO_x для открытой камеры сгорания (расчет выполнен по скорости тепловыделения)

коэффициента корреляции для двух других типов систем зажигания, участвовавших в эксперименте, приведены в табл. 2.

Одним из главных преимуществ данного метода оценки выбросов NO_x является его устойчивость к ошибкам тарировки датчиков давления. Она объясняется тем, что фактически в нем используются только величины, зависящие от массовых долей компонентов смеси. Такая «автоматическая нормализация» устраняет зависимость результатов измерений от чувствительности датчиков.

5.5. Оценка выбросов NO_x на основе температуры в цилиндре

Последний из рассматриваемых здесь методов состоит в оценке выбросов NO_x по давлению в цилиндре с помощью соответствующей ему моделируемой нульмерной температуры T_{0Mdim} . При этом использование усредненной по времени величины T_{0Mdim} для оценки выбросов NO_x весьма близко к упомянутому в разделе 2 современному методу контроля NO_x, известному как измерение температуры сгорания. На основании изложенной выше теории мы можем предположить наличие экспоненциальной зависимости между этой температурой и измеряемым выбросами NO_x, что и подтверждает характер разброса данных, показанный на рис. 11. Эксперимент, таким образом, свидетельствует о возможности адекватно оценить выбросы NO_x по нульмерной температуре, при этом для открытой камеры средняя относительная ошибка составляет $e_{mr} = 23,3\%$, а коэффициент корреляции $R = 0,92$. Сопоставление с аналогичными результатами для форкамеры (см. табл. 2) показывает, что в последнем случае точность оценки будет ниже. Это можно объяснить тем, что в расчете участвует температура главной камеры сгорания, что увеличивает погрешность в случае форкамеры с отдельным подводом газа, где рабочая смесь значительно богаче.

Таблица 2

Коэффициент коррекции R и оценка средней относительной ошибки e_{mr} для различных способов контроля NO_x и трех проверяемых методов воспламенения

	Открытая камера сгорания	Форкамера со свечей зажигания	Форкамера с запальным топливом
Хайдер/Зельдович	$R = 0,91;$ $e_{mr} = 23,88\%$	$R = 0,91;$ $e_{mr} = 25,37\%$	$R = 0,83;$ $e_{mr} = 53,48\%$
$f(hrr)$	$R_{exp} = -0,96;$ $e_{mr} = 15,33\%$	$R_{exp} = -0,94;$ $e_{mr} = 17,18\%$	$R_{exp} = -0,94;$ $e_{mr} = 28,80\%$
$f(T_{0-dim})$	$R_{exp} = 0,90;$ $e_{mr} = 21,76\%$	$R_{exp} = 0,91;$ $e_{mr} = 21,63\%$	$R_{exp} = 0,91;$ $e_{mr} = 35,22\%$

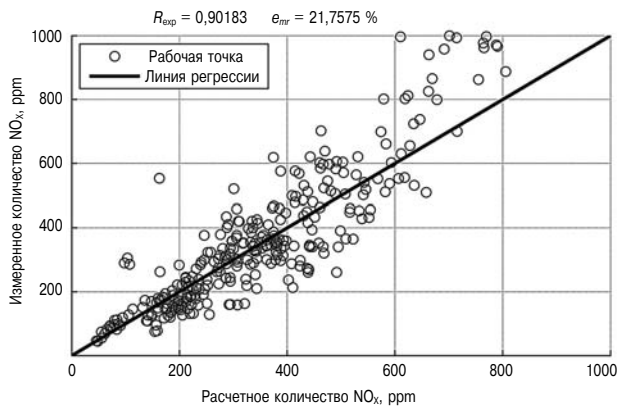


Рис. 11. Расчетное (ось X) и измеренное (ось Y) количество NO_x для открытой камеры сгорания (расчет выполнен по температуре в камере сгорания)

5.6. Погрешности определения NO_x

В разделах 5.3–5.5 рассматривались стационарные режимы. В этом разделе рассмотрены результаты исследования переходных режимов, проводившемся с повышенной частотой опроса (временным разрешением). В ходе опытов соотношение «воздух–топливо» постепенно повышалось (т. е. происходило обеднение смеси), вплоть до полного прекращения горения. Как видно из рис. 12, это сопровождалось значительным смещением середины и продолжительности сгорания. В результате выбросы NO_x снизились с ~1500 ppm до менее чем 100 ppm.

В ходе эксперимента, охватившего порядка 1000 рабочих циклов, выбросы NO_x определялись по скорости тепловыделения (с поцикловым вычислением), при этом полученные значения сравнивались с измеренными. В данном случае при измерении NO_x аппаратурой FTIR важно было обеспечить компенсацию запаздывания, которое составляло более 100 рабочих циклов. Запаздывание происходило вследствие наличия дистанции между выхлопной трубой и датчиком, а также из-за конечной скорости вычислений в самой аппаратуре FTIR. Стоит заметить, что это запаздывание, наряду с эффектом усреднения при прохождении сигналов по цепи измерения NO_x, зачастую является источником дополнительной ошибки определения NO_x, о чем подробнее будет сказано ниже.

На рис. 13 показаны результаты поцикловых вычислений и соответствующие результаты измерений с усреднением по 10 и 100 рабочим циклам. Точность определения NO_x при обсчете каждого рабочего цикла не слишком высока. Однако ошибку можно значительно снизить, увеличив число усредняемых рабочих циклов. В нашем случае ее удалось снизить примерно до 3%. Такое повышение точности происходит за счет уменьшения временного разрешения при определении NO_x.

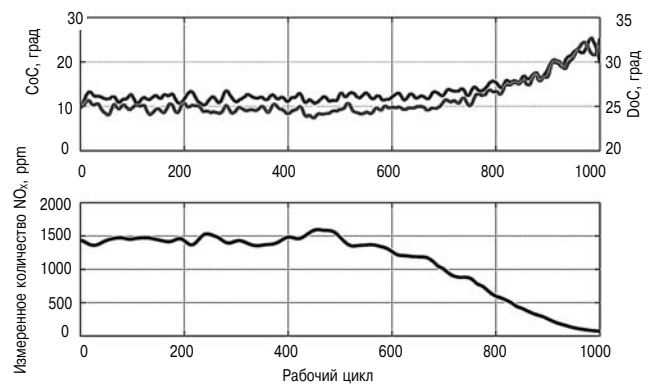


Рис. 12. Образование NO_x в переходном процессе

Результаты, приведенные на рис. 13, убедительно демонстрируют ограничение возможностей способа оценки точности определения NO_x путем сравнения результатов с результатами непосредственных измерений. Весьма вероятно, что значительные флуктуации при оценке выбросов NO_x по одному рабочему циклу связаны с тем, что вообще, как известно, флуктуации рабочего процесса при искровом зажигании довольно велики, а общий тренд оценки образования NO_x лучше, чем этого можно было бы ожидать, судя по диаграмме разброса для одного цикла. Достаточно малая (порядка 3%) ошибка определения NO_x по 100 рабочим циклам показывает, что качество оценки метода сильно зависит от точности синхронизации измерений NO_x и точности совмещения временных интервалов для усреднения результатов замеров и вычислений. Таким образом, оценка точности различных методов косвенного определения NO_x сильно зависит от того, насколько полно учтены свойства аппаратуры, используемой для прямого измерения.

Оценка выбросов NO_x по измеренному давлению в цилиндре с помощью теоретической модели образования NO_x, а также двух предложенных эмпирических моделей, использующих соответственно нульмерную температуру и характеристики тепловыделения показала, что фундаментальный подход, использующий основные положения

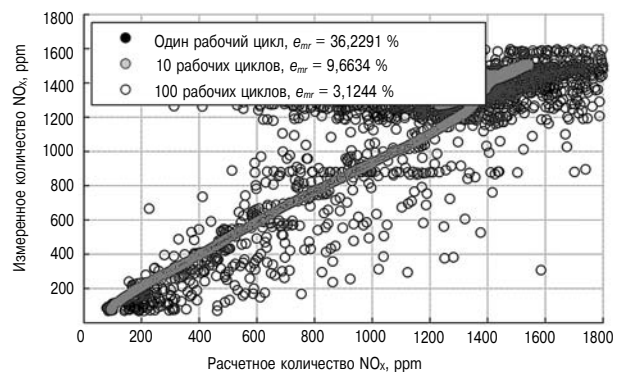


Рис. 13. Оценка точности расчетов по усредненным кривым давления

теоретической модели (Хайдера–Зельдовича), по своей эффективности не превосходит упрощенные косвенные методы. Это может быть объяснено сложностью точного определения температуры в зоне реакции, лежащей в основе теоретической модели. Кроме того, анализ переходных процессов показал, что точность оценки метода ограничена наличием запаздывания в существующей аппаратуре для измерения эталонных значений NO_x . Поэтому, возможно, точность предлагаемых методов определения выбросов NO_x даже выше, чем это следует из рассмотренных здесь примеров.

Заключение

Целью данной работы было углубленное исследование известной концепции определения выбросов NO_x на серийных двигателях с помощью измерения давления в цилиндре. При этом показана возможность отказа от применения специальных датчиков NO_x в случаях, когда сигнал давления в цилиндре уже используется в системах управления работой крупных газовых двигателей. Если системы управления двигателем строятся с учетом основ термодинамики, измерение давления в цилиндрах может быть использовано в том числе для расчета дополнительных входных сигналов управления, например, IMEP. Таким образом, появляется возможность отказаться от дополнительных датчиков, тем самым сделав систему управления двигателем более простой и унифицированной.

Были предложены две эмпирические модели контроля выбросов NO_x , а именно, по скорости тепловыделения и по величине T_{0_dim} , полученные в результате моделирования на основе описанной

предварительно теории образования NO_x . Обе предложенные эмпирические модели были проверены в эксперименте, результаты которого были сопоставлены с результатами непосредственного измерения выбросов NO_x . Полученные количественные результаты несомненно свидетельствуют о том, что контроль выбросов NO_x по скорости тепловыделения по точности и надежности превосходит другие методы, особенно в случае использования свечей зажигания в открытой камере сгорания или форкамере. Основным преимуществом данного метода с точки зрения его промышленных перспектив является то, что оценка NO_x производится непосредственно по скорости тепловыделения, и, следовательно, по давлению в цилиндре, поскольку в данном случае на результат не влияют погрешности тарировки датчиков давления.

До настоящего времени все существующие промышленные методы управления выбросами NO_x сводятся к регулированию соотношения «воздух–топливо» или коэффициента избытка воздуха λ . Перспективной представляется еще одна возможная тактика управления выбросами NO_x , основанная на функциональной связи между выбросами NO_x и моментом начала сгорания — управление углом опережения зажигания, определяющим угол начала сгорания. Такое управление может быть применено на любом газовом двигателе, более того — индивидуально по каждому цилиндру. Поэтому дальнейшие исследования будут сосредоточены на разработке систем динамического управления углом опережения зажигания.



Powering Business Worldwide

НОВОСТИ EATON

На Международном Автосалоне IAA в Ганновере (Германия) в сентябре 2012 г. многоотраслевая корпорация «Eaton» представила широкий спектр решений для производителей коммерческих автомобилей, которые позволяют повысить топливную экономичность и сократить количество вредных выбросов. В числе новинок:

- гидравлический компенсатор для двигателей большой и средней мощности, который улучшает компоновку деталей, упрощает монтаж и уменьшает затраты;

- UltraShift PLUS — новое семейство трансмиссий для работы в сложных условиях эксплуатации;

- пластиковые масляные поддоны и крышки цилиндров, которые помогут транспортному средству соответствовать стандартам Euro 6;

- инновационные решения для системы отопления и кондиционирования воздуха для коммерческих автомобилей: новое поколение внутренних теплообменников и фитингов без потери давления.



НОВОСТИ ТРАНСМАШХОЛДИНГА

«ПЕНЗАДИЗЕЛЬМАШ» ОСВАИВАЕТ СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА

«Пензадизельмаш» внедряет в конструкцию выпускаемых дизелей современные электронные системы управления впрыском топлива (ЭСУВТ), обеспечивающие повышение эффективности двигателя и снижение выбросов вредных веществ в атмосферу.

В 2010 г. на заводе были проведены стендовые испытания дизель генератора 1-ПДГ4Д, оборудованного системой ЭСУВТ. Результаты стендовых испытаний подтвердили эффективность ее применения, особенно на режимах частичных нагрузок и холостого хода, которые наиболее продолжительны при эксплуатации маневровых локомотивов типа ТЭМ18ДМ.

Эффективность новой системы впрыска топлива отслеживалась в течение года. В результате было зафиксировано снижение расхода топлива на 15–20 % на холостом ходу при уменьшении частоты вращения коленчатого вала с 300 до 240 об/мин. Результаты эксплуатационной проверки подтверждены актом приемочной комиссии, в работе которой принимали участие представители ОАО РЖД.

По окончании испытаний железнодорожники приняли решение о приобретении в ноябре 2012 года опытного тепловоза ТЭМ18ДМ с дизелем 1-ПД4Д оборудованным системой ЭСУВТ для проведения эксплуатационных испытаний.

НА КОЛОМЕНСКОМ ЗАВОДЕ ЗАВЕРШЕНЫ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

На Коломенском заводе успешно завершились межведомственные испытания (МВИ) новой дизель-генераторной установки ДГУ3200, разработанной и изготовленной по заказу ОАО «Атомэнергомаш» для системы резервного электроснабжения строящегося энергоблока № 4 Белоярской АЭС — единственной в России атомной электростанции с реакторами на быстрых нейтронах.

ДГУ3200 рекомендована к производству и применению на объектах заказчика. Председатель межведомственной комиссии, представитель Белоярской АЭС, отметил, что дизель-генераторная установка ДГУ3200 № 1 успешно выдержала приемочные испытания, результаты которых подтвердили ее соответствие техническому заданию заказчика.

По условиям контракта, заключенного в декабре 2010 г., ОАО «Коломенский завод» осуществляет комплектную поставку восьми дизель-генераторных установок в составе двух ДГУ4000, трех ДГУ3200 и трех ДГУ500. Мощность установок составляет 4000, 3200, 500 кВт соответственно. Двигатели предназначены для аварийного энергоснабжения АЭС в случае возникновения нештатной ситуации. ДГУ3200 планируется к отгрузке до конца сентября текущего года.

Главный конструктор по машиностроению

ОАО «Коломенский завод» В.А. Рыжов сообщил, что при проектировании LUE3200 с двигателем 16ЧН26/26 был использован опыт создания резервных двигателей для атомной электростанции в Бушере и двигателей 10Д49 для кораблей ВМФ. Системы автоматического управления позволяют обеспечить работу всего комплекса в автоматическом режиме без участия обслуживающего персонала».

Правительство Российской Федерации намерено к 2030 г. довести долю атомной генерации электроэнергии в общем объеме его производства до 25–30 % с сегодняшних 16 % за счет строительства 26 новых атомных энергоблоков. ОАО «Коломенский завод» имеет лицензии на право конструирования и изготовления оборудования для атомных электростанций. В 2004 г. на предприятии была изготовлена принципиально новая, полностью автоматизированная энергетическая установка второго класса безопасности для АЭС «Бушер-1» в Иране, которая прошла типовые испытания, подтвердившие соответствие требованиям РД ЭО 0052-00 и американского стандарта IEEEStd387-1995, действующим в атомной энергетике. В настоящее время Коломенский завод является единственным в России производителем резервных дизель-генераторных установок для АЭС.

**КОЛОМЕНСКИЙ ЗАВОД ЗАВЕРШИЛ ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРАКТА
ПО ПОСТАВКЕ В 2012 ГОДУ ТЕПЛОВЗОВ В БЕЛОРУССИЮ**

ОАО «Коломенский завод» завершило выполнение контракта по поставке в 2012 г. тепловозов в Белоруссию.

На Белорусскую железную дорогу (БЖД) отправлен пассажирский тепловоз ТЭП70БС. Еще два локомотива были переданы заказчиком в июне и июле текущего года. В общей сложности в 2012 г. договорные обязательства Коломенского завода предусматривают отправку в Белоруссию 3 тепловозов ТЭП70БС, 38 дизель-генераторов для модернизации грузовых тепловозов и партии запасных частей.

С 2006 г. Коломенский завод поставил на БЖД 25 пассажирских локомотивов данной серии. Участками их активной эксплуатации являются направления Минск–Гродно, Минск–Вильнюс, Минск–Гомель.

Белорусские железнодорожники, проверив на практике работу ТЭП70БС, отмечают соответствие всех характеристик локомотива заданным в технической документации параметрам.



«ВИТЯЗЬ» С ДИЗЕЛЕМ ФИРМЫ MTU ОТПРАВИЛСЯ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПРОБЕГ

Специалисты Брянского машиностроительного завода приступили к эксплуатационным испытаниям магистрального грузового тепловоза с асинхронным приводом 2ТЭ25АМ-001, который оснащен дизелем 20V4000R43 фирмы MTU (Германия).

Программой испытаний предусмотрен 5000-километровый испытательный пробег, который локомотив выполняет под наблюдением специалистов организаций, принимавших участие в его создании — MTU, ВНИКТИ и БМЗ. Базой для испытаний избрано депо станции Брянск-Льговский (Московская железная дорога). В июле 2012 г. тепловоз с составом массой 6000 т отпра-

вился в первую поездку по маршруту Брянск–Гомель (Белоруссия)–Брянск.

Локомотив создан на БМЗ на базе тепловоза 2ТЭ25А «Витязь». От базовой модели он отличается силовой установкой и связанными с ней агрегатами.

Двадцатицилиндровый двигатель 20V4000R43 с V-образным расположением цилиндров под углом 90° развивает номинальную мощность 2700 кВт (3672 л. с.) при 1800 об/мин. Удельный расход топлива при этом составляет 194–208 г/кВт·ч.

На тепловозе используется необслуживаемая система конденсаторного запуска CaPoS, разработанная MTU. Кроме того, для охлаждения дизеля применяется не вода, а антифриз, что повышает безопасную эксплуатацию двигателя при пониженных температурах. 2ТЭ25АМ оснащен автономным подогревателем «Webasto» для поддержания оптимальной температуры теплоносителей дизеля перед запуском.

Новый тепловоз оборудован микропроцессорной системой управления и диагностики, а также комплексом локомотивных устройств безопасности.

ЗАО «Трансмашхолдинг» и ОАО «Российские железные дороги» заключили договор на поставку 10 грузовых тепловозов 2ТЭ25АМ с дизелями фирмы MTU.



УДК 621.41

Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И., Дворцов В.С., Ноздрин Г.А., Абакшин А.Ю. Перспективы улучшения характеристик двигателя Стирлинга // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 3–6.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, регенератор, моделирование, бесшатунный силовой механизм, диссоциирующие газы, вихревая холодильная трубка.

Представлены направления исследований по совершенствованию характеристик двигателей с внешним подводом теплоты, а именно: совершенствование методики аналитического расчета; численное моделирование элементов двигателей; применение бесшатунного силового механизма, использование диссоциирующих газов в качестве рабочего тела. Ил. 7. Библ. 13 назв.

УДК 621.43.038.12

Еникеев Р.Д., Домбровский О.П., Гарипов М.Д. Экспериментальные характеристики двухтактного бензинового двигателя с высокой степенью сжатия // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 7–11.

Ключевые слова: поршневой ДВС, рабочий процесс, непосредственный впрыск бензина, степень сжатия, детонация, выбросы вредных веществ.

Предложен способ реализации бездетонационного сгорания в бензиновых двигателях при повышенных степенях сжатия. Экспериментально установлена зависимость содержания углеводородов, оксида углерода и оксидов азота в составе отработавших газов в зависимости от степени сжатия. Определено оптимальное значение степени сжатия с точки зрения топливной экономичности и вредных выбросов. Ил. 16. Библ. 1 назв.

УДК 621.785

Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 12–15.

Ключевые слова: конструкционные стали, алюминиевые и титановые сплавы, прочность, пластичность, термическая обработка, газоимпульсная обработка.

Рассмотрены способы повышения конструктивной прочности металлических машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки. Показана возможность достижения более высокой конструктивной прочности углеродистых и легированных сталей без применения закалки на мартенсит с последующим отпускком. Предложена технология упрочнения алюминиевых и титановых сплавов после закалки и последующего старения. Ил. 1. Библ. 3 назв.

УДК 621.43.057.3

Аттия А.М.А., Кульчицкий А.Р. Влияние структуры водотопливной эмульсии на экологические и экономические показатели дизеля // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 16–20.

Ключевые слова: дизели, водотопливная эмульсия, мембранное эмульгирование, структура эмульсии, снижение вредных выбросов.

Приведено описание способа управления структурой ВТЭ, полученной методом мембранного эмульгирования. Представлены результаты исследования влияния ВТЭ с заданной структурой на улучшение экологических показателей двигателя. Ил. 6. Библ. 14 назв.

УДК 621.43.068.8

Пушнин В.П. Применение метода электропроводности для анализа структуры дизельной сажи // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 21–25.

Ключевые слова: дизельная сажа, условия образования, электрическое сопротивление сажи, структура первичных агрегатов, «сварка» агрегатов сажи тяжелых топлив.

Выполнен сравнительный анализ условий образования дизельной сажи и технического углерода. Разработано и испытано устройство для определения электрического сопротивления сажи, полученной при сжигании различных топлив. Экспериментально исследованы свойства сажи дистиллятных и тяжелых топлив (включая водотопливную эмульсию). Сформулирована гипотеза о структуре первичных агрегатов сажи тяжелых топлив и их «сварке» в точке касания в присутствии соединений ванадия с низкой температурой плавления. Табл. 4. Ил. 5. Библ. 12 назв.

УДК 621.436

Назаров А.Д. Способ компенсации суммарной неуравновешенной массы деталей КШМ двигателей V-8 при их изготовлении и ремонте // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 26–30.

Ключевые слова: двигатели V-8, действительная уравновешенность, суммарная неуравновешенная масса деталей КШМ, способ уравновешивания.

Разработан способ уравновешивания суммарной неуравновешенности массы деталей КШМ за счет изменения конструкции и массы пробок грязесборника кривошипа коленчатого вала. Табл. 3. Ил. 2. Библ. 5 назв.

УДК 621.431.74

Герасиди В.В., Жук А.Н., Николаев Н.И. Применение твердых материалов для очистки проточной части турбокомпрессоров // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 31–33.

Ключевые слова: судовые дизели, турбокомпрессор, загрязнение элементов проточной части, очистка порошками твердых материалов.

Рассмотрены условия загрязнения элементов проточной части турбины среднеоборотных судовых дизелей при работе на различных сортах топлива. Показана низкая эффективность стандартной процедуры промывки элементов радиальных турбин водой. Предложен способ очистки проточной части порошками твердых сухих очистителей с различными свойствами. Экспериментально установили незначительный износ элементов проточной части ТК за время очистки в сравнении с общим износом в процессе эксплуатации. Ил. 2. Библ. 11 назв.

УДК 621.431.74.004

Васькевич Ф.А., Калинин О.Д. Особенности конструкции ТНВД дизеля 5S70MC-C и их влияние на технико-экономические показатели // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 34–36.

Ключевые слова: судовой двухтактный дизель, топливная аппаратура, дефекты регулирования, снижение топливной экономичности, износ втулки цилиндра.

Установлены дефекты заводской регулировки топливной аппаратуры главного дизеля 5S70MC-C танкера «Лиговский проспект». Обнаруженные дефекты снижают экономичность двигателя, являются причиной тепловой перегрузки деталей камеры сгорания и повышенных износов цилиндров при работе на частичных нагрузках. Ил. 2. Библ. 2 назв.

УДК 621.43

Жмудяк Л.М., Жмудяк А.Л., Абрамов Е.Г. Результаты математического моделирования однопоршневого свободнопоршневого двигателя // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 37–39.

Ключевые слова: однопоршневой свободнопоршневой двигатель, математическое моделирование рабочего процесса, частота циклов, устойчивость работы.

Рассмотрены конструкция и рабочий процесс однопоршневого свободнопоршневого двигателя (генератора газа) без клапанов на окнах в гильзе. Создана и реализована программно-математическая модель двигателя. Приведены результаты расчета рабочего цикла двигателя, в одной полости которого (по одну сторону поршня) осуществляется сгорание топлива, а полость с другой стороны поршня является буферной. Показано, что устойчивость рабочих циклов зависит от конструктивных соотношений деталей цилиндра. Табл. 2. Ил. 2. Библ. 3 назв.

УДК 621.436

Совке С. и др. Контроль выбросов NO_x в мощных газовых двигателях по давлению в цилиндре (материалы конгресса СИМАС 2010) // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 40–51.

Ключевые слова: газовые двигатели, контроль выбросов NO_x, давление в цилиндре, индикаторная диаграмма.

Предлагается метод контроля выбросов NO_x по записи диаграммы давления в цилиндре. Метод реализован за счет сигнала датчика давления, способного длительное время выдерживать экстремальные условия камеры сгорания, а также программных и аппаратных средств обработки информации в реальном времени. Показано, что существующие системы обработки сигнала давления могут быть дополнены новой функцией, что избавляет от необходимости использовать отдельный датчик NO_x для контроля выбросов в эксплуатации. Табл. 2. Ил. 13.

UDC 621.41

Kukis V.S., Kukolev M.I., Kostin A.K., Dvortsov V.S., Nozdrin G.A., Abakshin A.Ju. Ways to Improve Performance of External Combustion Engines // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 3–6.

Keywords: Stirling engine, recuperator, modeling, conrod-free drive, dissociating gases, vortical cooling tube.

The article discusses possible ways to improve performance of external combustion engines, viz.: better calculation methods; numerical simulation of engine components; use of conrod-free drive; use of dissociating gas as a working substance. 7 ill., 13 ref.

UDC 621.43.038.12

Yenikeev R.D., Dombrovsky O.P., Garipov M.D. Optimization of Two-Stroke High Compression Rate Petrol Engine // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 7–11.

Keywords: Reciprocating engine, combustion process, direct injection of petrol, compression rate, detonation, noxious emissions.

The authors offer a detonation-free combustion technology for petrol engines with high compression rate. The method is based on empirical dependence of noxious emissions, such as hydrocarbons, carbon monoxide and nitrogen oxides, on engine compression rate. Optimum compression rate value is derived, based on a trade-off between fuel efficiency and emission performance. 16 ill., 1 ref.

UDC 621.785

Ivanov D.A., Zasukhin O.N. Controlled Gas Explosion Technology Combined with Thermal Treatment Improves Strength of Construction Materials // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 12–15.

Keywords: Structural steels, aluminum and titanium alloys, mechanical strength, ductility, thermal treatment, controlled gas explosion technology.

The article discusses ways to improve strength of construction materials through use of controlled gas explosion technology combined with thermal treatment. The method in question is demonstrated as a means of strengthening carbon and alloyed steels with no martempering. A method is offered of hardening carbon and alloyed steels after their quenching and subsequent aging. 1 ill., 3 ref.

UDC 621.43.057.3

Attyyah A.M.A., Kulchitsky A.R. Influence of Water/Fuel Emulsion Structure on Engine Fuel Efficiency and Environmental Performance // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 16–20.

Keywords: diesel engines, water/fuel emulsion, membrane emulsification, emulsion structure, reduction of noxious emissions.

A method is described that enables control over a structure of water/fuel emulsion produced with membrane emulsification technology. A dependence between engine environmental performance and emulsion structure is analyzed. 6 ill., 14 ref.

UDC 621.43.068.8

Pushnin V.P. Analysis of Engine Soot Structure with Electrical Conduction Method // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 21–25.

Keywords: engine soot, soot generation conditions, soot electrical conduction, structure of primary aggregates, agglutination of heavy fuel aggregates.

A comparative analysis is carried out of conditions of engine soot and carbon black generation. A device was designed and tested for determination of electrical conduction of soot resulting from combustion of various fuels. Characteristics of soot yielded from combustion of distillate and heavy fuels (including water/fuel emulsion) were investigated. The authors offer a hypothesis concerning structure of heavy fuel aggregates and

their coalescing in presence of vanadium compounds with low melting point.

5 ill., 4 tables, 12 ref.

UDC 621.436

Nazarov A.D. Compensation of Total Unbalanced Mass of V-8 Engines in Process of Their Manufacturing and Repair // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 26–30.

Keywords: V-8 engines, actual balance, total crank gear balance, balancing method.

A method is offered of how to eliminate crank gear total unbalance in V-8 engines through change in shape and mass of crank sludge pan plugs. 2 ill., 3 tables, 5 ref.

UDC 621.431.74

Gherasidi V.V., Zhuk A.N., Nicolaev N.I. Cleaning of Turbocharger Air-Gas Channel With Hard Materials // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 31–33.

Keywords: marine engines, turbocharger, air-gas channel clogging, cleaning with abrasive powder.

Conditions are considered of air-gas channel clogging in marine engine turbochargers depending on fuel type. Typical technology of washing radial turbines with water is demonstrated as basically inefficient. A method in question implies cleaning with powder of various hard dry cleaners. Cleaning-related wear of air-gas channel surfaces was found negligible compared with normal operating wear. 2 ill., 11 ref.

UDC 621.431.74.004

Vaskiewich F.A., Kalinin O.D. Fuel Injection Pumps of Marine Engine Type 5S70MC-C: Factory Settings Specifics // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 34–36.

Keywords: two-stroke marine engine, fuel delivery system, improper settings, loss in fuel efficiency, cylinder liner wear.

A research carried out by the authors revealed some shortcomings in standard factory settings of fuel injection pumps of marine engine type 5S70MC-C powering tanker «Ligovsky Prospect». Said shortcomings affect engine fuel efficiency, result in excessive thermal load on combustion chamber parts and excessive wear of cylinder liners during partial-load operation. 2 ill., 2 ref.

UDC 621.43

Zhmudiyak L.M., Zhmudiyak A.L., Abramov Ye.G. Simulated Operation of a Free-Piston (Single-Piston) Engine // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 37–39.

Keywords: free-piston (single-piston) engine, combustion simulation, cycle frequency, stability of operation.

The research in question focuses on free-piston (single-piston) engine (gas generator) featuring no valves in cylinder liner ports. Engine operation was simulated with specially designed mathematical model. The piston separates cylinder volume into two spaces, one of which forms a combustion chamber, while another one forms a buffer chamber/ Process cycle stability is shown as dependent on relative dimensions of cylinder parts. 2 ill., 2 tables, 3 ref.

UDC 621.436

S. Sofke at al. Controlling NO_x Emissions of Large Gas Engines Based on In-Cylinder Pressure Measurement (papers of CIMAC 2010) // *Dvigatelistroyeniye*. — 2012. — № 3. — P. 40–51.

Keywords: gas engines, control of emissions, in-cylinder pressure, indicator diagram.

The paper offers a general NO_x control intended for in-cylinder pressure measurement. The method is implemented through the use of a pressure sensor capable of continuous operation exposed to extremely high pressure and temperature, combined with means of online process signal processing. The implication is that existing signal processing systems may be just added with a new feature, which enables to avoid any further specific NO_x control sensors. 2 tables, 13 ill.

Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на гибком диске 3,5" или CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисовочными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисовочных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

Редакция журнала