

ВЛИЯНИЕ ГОМОГЕНИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ СМЕСИ И РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА И САЖИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Р.З. Кавтарадзе

kavtaradzerz@mail.ru

Э.В. Бахрамов

elsbac@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследования рабочего процесса быстроходного дизеля, полученные с применением 3D-модели, учитывающей кинетику образования оксидов азота и сажи и верифицированной с использованием экспериментальных данных. Проанализированы различные концепции рабочего процесса: серийного (базового) без рециркуляции отработавших газов, модифицированного серийного с рециркуляцией и измененной конструкцией распылителя форсунки, а также два процесса с частично гомогенным сгоранием, предусматривающие пятикратные впрыскивания топлива. Выполнен сравнительный анализ экологических и эффективных показателей исследуемых рабочих процессов, позволяющий оценить их потенциальные возможности

Ключевые слова

Дизель, 3D-моделирование, частично-гомогенное сгорание, рециркуляция отработавших газов, образование оксидов азота и сажи

Поступила в редакцию 24.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00275а)

Состояние вопроса. Цель исследования. Основной проблемой усовершенствования рабочего процесса современных дизелей, в которых процесс сгорания носит гетерогенный характер, является минимизация эмиссии оксидов азота и сажи. Поскольку образованию NO_x (точнее NO , доля которого в NO_x составляет 90...95 %) способствуют высокие температуры в локальных очагах сгорания, а образованию сажи — низкие значения локальных коэффициентов избытка воздуха, была разработана новая концепция рабочего процесса дизеля с гомогенным сгоранием, известная под названием HCCI-процесс (Homogeneous Charge Compression Ignition). Основная идея этой концепции заключается в подготовке гомогенной топливовоздушной смеси и ее воспламенении от сжатия. При этом значения локальных коэффициентов избытка воздуха одинаковы и превышают предельное значение, ниже которого начинается образование сажи. В результате максимальные локальные температуры в камере сгорания (КС) уменьшаются, становятся заметно ниже, чем в процессе гетерогенного сгорания, и меньше предельного значения (1800 К), больше которого, согласно теории Зельдовича, начинает действовать термический механизм образования NO [1, 2]. Концептуально HCCI-процесс относится к категории так называемого Low Temperature

Combustion (LTC) — низкотемпературного сгорания заранее перемешанной и гомогенизированной смеси. HCCI-процесс пока не нашел практического применения, прежде всего, из-за неуправляемого процесса сгорания, в частности, преждевременного воспламенения [3–5]. В целях решения этой проблемы, а также предотвращения роста механических нагрузок и эмиссии шума применяется рециркуляция отработавших газов (РОГ), благодаря которой замедляется скорость тепловыделения.

В настоящей статье приведены результаты исследования четырех различных концепций рабочего процесса быстроходного дизеля: базового (серийного) без РОГ, а также трех альтернативных — модифицированного базового с РОГ и измененной конструкцией распылителя форсунки и двух вариантов частично гомогенного сгорания с многократным впрыскиванием. Цель работы — проведение сравнительного анализа указанных концепций рабочего процесса с точки зрения их экологических и эффективных показателей и выяснение потенциальных возможностей исследуемых альтернативных вариантов.

Параметры исследуемого дизеля и краткие характеристики рассмотренных концепций рабочего процесса. Исследования проводились для одноцилиндрового отсека быстроходного дизеля OM 500 (Daimler-Benz).

Параметры опытного двигателя OM 500 (Daimler-Benz)

Модель двигателя	OM 500
Диаметр цилиндра / ход поршня D/S , мм/мм	130/150
Степень сжатия ϵ	14,7
Число клапанов на цилиндр	4
Система впрыскивания	CR

Отметим, что в [6, 7] изложены результаты экспериментов, проведенных на дизеле OM 500 для случаев с различными вариантами рабочего процесса как базового, так и альтернативных с гомогенным сгоранием.

Далее приведены характеристики впрыскивания с указанием количества топлива в долях цикловой подачи $m_{ц}$ и задержки отдельного впрыскивания относительно предыдущего в градусах угла поворота коленчатого вала (УПКВ). Исследуются следующие варианты рабочего процесса.

1. Базовый (серийный) процесс (рис. 1, а) с гетерогенным сгоранием предусматривает двукратное (предварительное + основное) впрыскивание с промежуточным интервалом 4° УПКВ и общей продолжительностью впрыскивания 19° УПКВ. Угол конусности впрыскивания топлива (УКВТ), угол между осями соплового отверстия и цилиндра составляет 160° , а давление впрыскивания $p_{впр} = 1600$ бар. Распределение цикловой подачи топлива (в долях) $\bar{m}_{ц} = 0,2 + 0,8 = 1$.

2. Модифицированный процесс с гетерогенным сгоранием. Характеристика впрыскивания такая же, как у серийного дизеля (см. рис. 1, а). В отличие от серийного процесса предусматривается применение РОГ (степень рециркуляции $z = 20\%$) и уменьшение УКВТ до 10° .



№ порции	1	2
Количество	0,2000	0,8000
Задержка	0,00	4,00

а



№ порции	1	2	3	4	5
Количество	0,1800	0,1500	0,1500	0,1500	0,3700
Задержка	0,00	15,00	14,00	15,00	20,00

б



№ порции	1	2	3	4	5
Количество	0,1500	0,1800	0,2000	0,2200	0,2500
Задержка	0,00	6,00	6,00	6,00	6,00

в

Рис. 1. Характеристика впрыскивания для базового (серийного) процесса (а) и для частично гомогенного сгорания-1 (б), сгорания-2 (в)

3. Частично гомогенное сгорание-1 (разделенное сгорание — Split Combustion). Все дозы разделенной подачи топлива впрыскиваются до верхней мертвой точки (ВМТ). После первого впрыскивания при $\varphi = 90^\circ$ УПКВ до ВМТ последовательно впрыскиваются три одинаковые порции топлива (рис. 1, б). Такое

раннее четырехтактное впрыскивание, предложенное в настоящей работе, приводит к гомогенизации топливоздушнoй смеси. После окончания подачи четвертой дозы топлива с задержкой на 20° УПКВ впрыскивается пятая заключительная порция, инициирующая гетерогенное сгорание. Цикловая подача топлива делится так: 63 % — гомогенное сгорание (первые четыре впрыскивания) и 37 % — гетерогенное сгорание (пятое, заключительное впрыскивание). Угол конусности впрыскивания топлива 100° . Давление впрыскивания по сравнению с базовым процессом снижено до $p_{\text{впр}} = 850$ бар. Распределение цикловой подачи (в долях) $\bar{m}_{\text{ц}} = 0,18 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,37 = 1$. Значение цикловой подачи топлива такое же, как в серийном и модифицированном процессах. Используется РОГ со степенью рециркуляции $z = 29$ %.

4. Частично гомогенное сгорание-2 экспериментально исследовано в [7]. Все дозы разделенной подачи топлива впрыскиваются до ВМТ, угол опережения впрыскивания первой порции составляет 79° УПКВ (рис. 1, в). При этом вся цикловая масса топлива подается в цилиндр за 27° УПКВ до ВМТ. Угол конусности впрыскивания топлива 160° . В результате пятикратного впрыскивания цикловая доза топлива распределяется по долям $\bar{m}_{\text{ц}} = 0,15 + 0,18 + 0,20 + 0,22 + 0,25 = 1$. Интервал времени между отдельными впрыскиваниями соответствует 6° УПКВ. Используется РОГ со степенью рециркуляции $z = 61$ %.

Характерные данные по исследуемым вариантам рабочего процесса, использованные при численных экспериментах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования исследуемых рабочих процессов

Параметры двигателя	Базовый (серийный) процесс	Модифицированный процесс	Частично гомогенное сгорание	
			1	2
Частота вращения коленчатого вала n , мин ⁻¹	1100	1100	1100	1100
Давление наддува P_k , бар	1,46	1,46	1,46	1,46
Температура впуска t_k , °C	42	65	74	74
Цикловая подача $m_{\text{ц}}$, г	0,07	0,07	0,07	0,07
Коэффициент избытка воздуха α_v	3,17	2,6	2,2	1,07
Степень РОГ z , %	0	20	29	61
Максимальное давление впрыскивания p_z , бар	1600	1600	850	850
Угол опережения впрыскивания, градус УПКВ	12	18	90	79
Кратность впрыскивания топлива за цикл	2	2	5	5
Число z (шт.) \times диаметр d_c (мм) сопловых отверстий распылителя	$9 \times 0,12$	$9 \times 0,12$	$9 \times 0,12$	$9 \times 0,12$
Угол конусности впрыскивания, град	160	100	100	160

Моделирование рабочего процесса дизеля. Верификация модели. Моделирование серийного, а также альтернативных рабочих процессов проводилось с использованием 3D-модели, основанной на фундаментальных уравнениях нестационарного переноса и химической кинетики. Основные уравнения количества движения Навье — Стокса, энергии Фурье — Кирхгофа, диффузии Фика и неразрывности, записанные для турбулентного переноса, после осреднения по методу Фавра, принимают соответственно вид [2]:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{D\bar{W}_i}{D\tau} &= \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) - \bar{\rho} \overline{W_i'W_j'} \right]; \\ \bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{D\tau} &= \bar{G}_j \bar{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} \bar{W}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p \bar{\rho} \overline{T'W_j'} \right) + \bar{w}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \bar{q}_{Rj}}{\partial x_j}; \quad (1) \\ \frac{D\bar{C}}{D\tau} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \bar{C}'W_j' \right) + \bar{m}; \\ \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{W}_j) &= 0, \end{aligned}$$

где ρ — плотность; $\frac{D}{D\tau}$ — субстанциональная производная; W — скорость; G_i — проекция вектора плотности объемных сил на ось Ox_i прямоугольной декартовой системы координат; p — давление; μ — динамическая вязкость; δ_{ij} — символ Кронекера; H — полная удельная энергия; λ — теплопроводность; c_p — теплоемкость при постоянном давлении; w_r — скорость химической реакции на единицу объема; Q_r — количество выделяемой теплоты на единицу массы; q_{Rj} — радиационный тепловой поток; C — концентрация; D — коэффициент диффузии; \dot{m} — интенсивность источника массы (скорость изменения массы химической компоненты в единице объема. В уравнениях (1) использовано правило суммирования А. Эйнштейна по дважды повторяющемуся индексу i, j, k , называемому индексом суммирования.

Расчет рабочего процесса осуществлялся с помощью модуля ESE DIESEL программного комплекса FIRE [8]. Расчетная область в этом модуле представляет собой сектор КС дизеля OM 500, разбиение которого на отдельные контрольные объемы проводится поворотом двухмерной сетки вокруг оси цилиндра (рис. 2). Ограничения данного подхода: во-первых, КС должна быть осесимметричной, во-вторых, моделируются только сжатие и рабочий ход двигателя, а процессы впуска-выпуска не моделируются и учитываются заданием начальных и граничных условий. Количество контрольных объемов (КО) постоянно изменяется во время движения поршня от нижней мертвой точки (НМТ) до ВМТ и

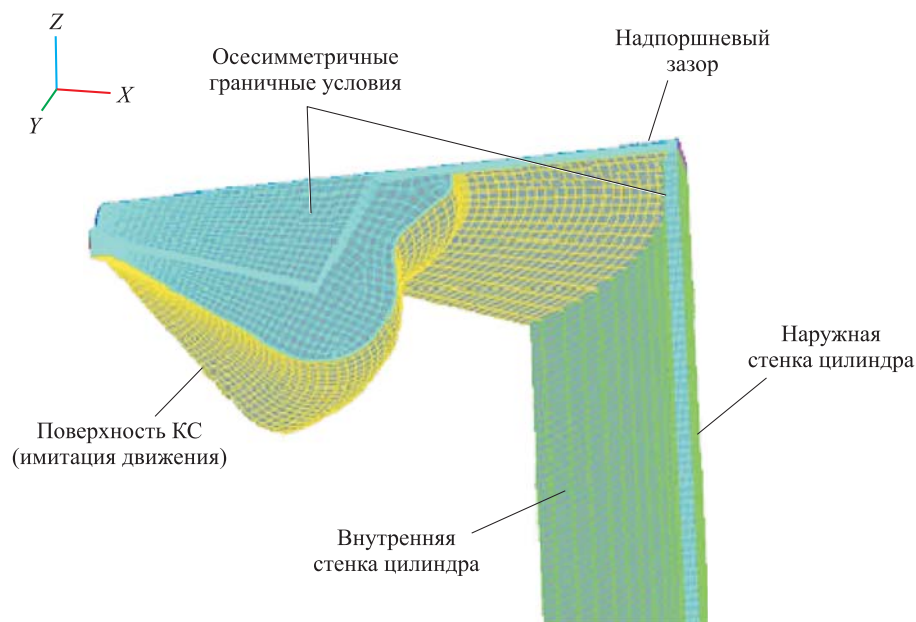


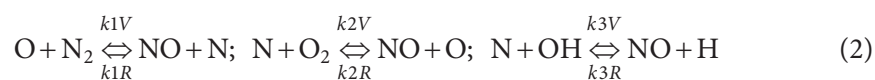
Рис. 2. Разбиение расчетной области (сектора КС дизеля OM 500) на контрольные объемы

обратно. Каждому временному интервалу соответствует своя расчетная сетка. Так, при положении поршня в ВМТ число КО равно 3154 шт., а при положении поршня в районе НМТ — 6955 шт. Средний размер элемента сетки равен 1 мм.

Полуразделенная КС (в поршне) имеет такую же форму и геометрические размеры, что и на экспериментальном дизеле OM 500 [1, 2]. Смоделированная КС соответствует степени сжатия $\varepsilon = 14,66$, а КС экспериментального двигателя имеет $\varepsilon = 14,7$. Во всех исследуемых вариантах рабочего процесса имеется форсунка с центральным расположением в КС, имеющая распылитель с девятью сопловыми отверстиями, диаметр отверстия $d_c = 0,12$ мм (см. табл. 1).

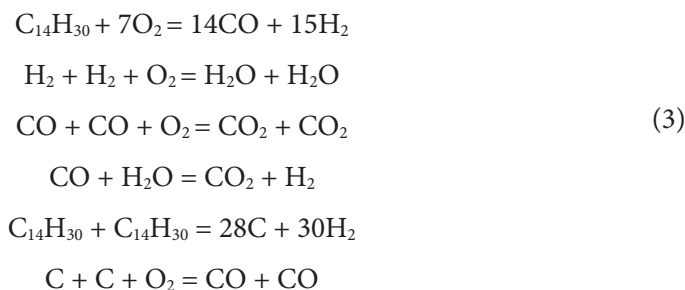
Для моделирования процесса турбулентного сгорания топливовоздушной смеси используется модель когерентного пламени (CFM-модель) [2, 8]. В основе этой модели лежит допущение о том, что характерный масштаб времени для химических реакций намного меньше по сравнению с масштабом времени турбулентности. В CFM-модели акцент делается на изменение площади фронта пламени. Обычно такая модель применима как для условий с предварительным смешиванием, так и без такового, поскольку основана на концепции распространения ламинарного пламени, согласно которой усредненная по всему фронту пламени скорость w_f и толщина фронта δ_f зависят только от давления, температуры и состава свежего заряда. Из известных вариантов CFM-модели в настоящей работе использовалась ECFM-3Z-модель, созданная специально для моделирования рабочего процесса дизеля [8].

В поршневых двигателях всего 5...10 % суммарных оксидов азота образуются в соответствии с механизмом Феннимора («быстрые» NO) и примерно 90...95 % — с механизмом Зельдовича (термические NO) [2], в настоящей работе используется расширенный термический механизм, в котором к двум реакциям Зельдовича, добавляется третья, введенная Баулхом и другими [9]:



Здесь обозначения при константах k скоростей реакции указывают на номер химической реакции из (2) и направление реакций, при этом V — прямая реакция, R — обратная. Заметим, что определяющей из этих трех реакций расширенного механизма Зельдовича (2) является первая реакция, скорость которой зависит от концентрации атомарного кислорода.

Образование сажи — сложный, многоэтапный химико-физический процесс, состоящий из цепочки последовательных процессов, протекающих как в газовой фазе, так и по гетерогенному механизму. В последнее время наибольшее распространение находят упрощенные кинетические модели, основанные на решении так называемых глобальных уравнений химической кинетики для основных стадий сажеобразования. К этой группе моделей можно отнести кинетическую модель для дизельного топлива с химической формулой $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ (тетрадекан), предложенной в [10] С.М. Фроловым:



Кинетическая модель (3) была использована для расчета концентрации сажи при моделировании рабочих процессов исследуемых дизелей.

Начальные условия для моделирования исследуемых вариантов рабочего процесса (давление наддува, температура впуска и т. д.) приведены в табл. 1. Верификация модели рабочего процесса (1), ранее успешно апробированного для различных концепций поршневых двигателей [11–13], в том числе и дизелей с гомогенным сгоранием [14, 15], проводилась путем сравнения результатов численных и натурных экспериментов. На рис. 3 приведено сопоставление расчетной и экспериментальной индикаторной диаграмм дизеля OM 500 с базовым (серийным) вариантом закона подачи топлива (см. рис. 1, а). Разность значений максимальных давлений цикла p_z составляет 3,2 бара, а осредненных за цикл давлений — 1,5 %. Сдвиг по УПКВ между пиковыми значениями давлений 2°.

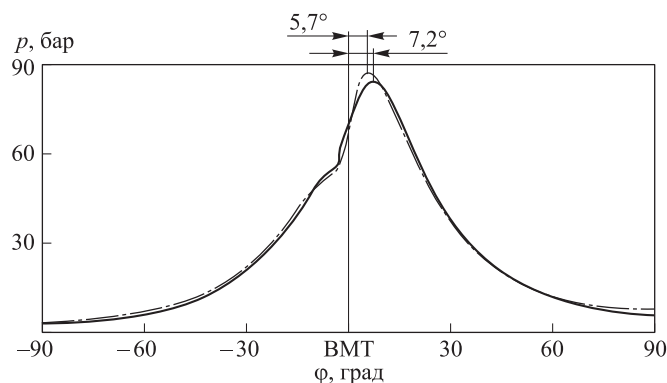


Рис. 3. Сопоставление индикаторных диаграмм, полученных по результатам численного (сплошная линия) и натурального (штрихпунктирная линия) экспериментов

Исследования влияния различных конструкторских и регулируемых факторов на экологические и эффективные показатели двигателя далее проводились с использованием экспериментально верифицированной модели рабочего процесса.

Влияние альтернативных рабочих процессов на образование оксидов азота. На рис. 4 приведены температурные поля рабочего тела в КС в различные моменты времени для отдельных исследуемых вариантов рабочего процесса. Видно, что при традиционном дизельном процессе с гетерогенным сгоранием температура в цилиндре распределена весьма неравномерно. Максимальные значения локальных температур превышают 2600 К. Как отмечалось ранее, зоны КС с высокой температурой (выше 1800 К) являются очагами образования оксидов азота. Число таких зон в КС традиционного (серийного) двигателя увеличивается по мере развития процесса сгорания (рис. 4, а). Образование первых высокотемпературных зон (очагов сгорания) наблюдается к моменту достижения поршнем ВМТ ($\varphi = 360^\circ$) на наружной поверхности топливного факела, а дальше они перемещаются в пристеночных областях, где топливный факел контактирует со стенками КС. Область высоких температур при развитом процессе сгорания, например к моменту времени $\varphi = 370^\circ$, намного больше, чем аналогичная область в начальной фазе сгорания ($\varphi = 365^\circ$) и объясняется развитием процесса гетерогенного сгорания. Очевидно, что к моменту времени $\varphi = 370^\circ$ следует ожидать увеличенное образование оксидов азота, что дальше в статье будет подтверждаться их суммарными значениями.

При внутренней гомогенизации смеси посредством раннего многократного впрыскивания топлива существует тенденция увеличения несгоревших углеводородов СН [2, 7]. В связи с этим УКВТ следует задавать таким, чтобы избежать попадания топлива на холодные стенки КС и накопления топлива на ее поверхности. Дальнобойность топливных струй можно регулировать давлением впрыскивания. Поэтому в целях снижения локальных температур рабочего тела в процессе сгорания и уменьшения выбросов NO_x , предложен модифицированный вариант серийного дизельного рабочего процесса (см. табл. 1), в котором

УКВТ уменьшен до 100° и добавлена система РОГ со степенью рециркуляции $z = 20\%$, угол опережения впрыскивания увеличен до $\varphi_{\text{впр}} = 18^\circ$ УПКВ и повышена температура свежего заряда при впуске до 65°C . Давление впрыскивания, диаметр и число сопловых отверстий не менялись — оставались как у серийного процесса. Отметим, что сокращенный угол впрыскивания топлива способствует повышению равномерности распределения локальных температур, снижению их максимальных значений и уменьшению локальных концентраций оксидов азота в цилиндре.

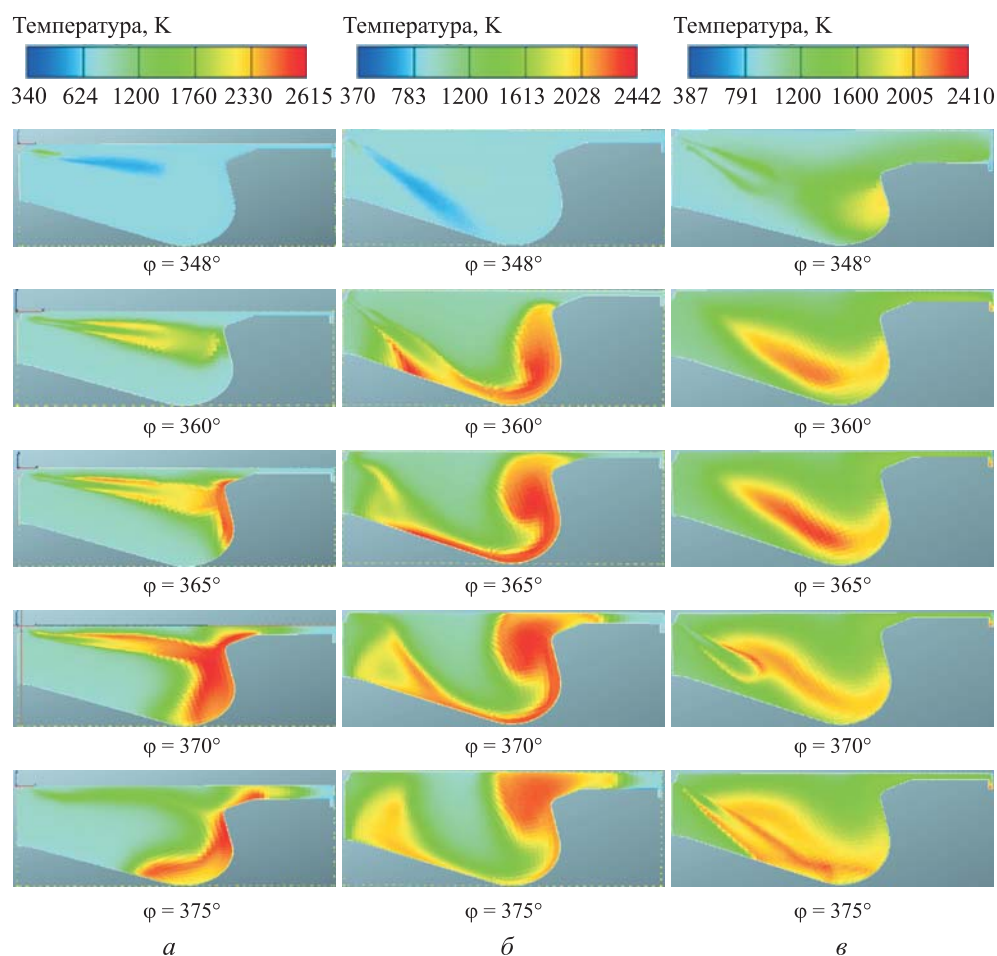


Рис. 4. Локальные мгновенные температуры в КС для разных вариантов рабочего процесса:

a — базовый (серийный) процесс; *б* — модифицированный процесс; *в* — частично гомогенное сгорание-1

Применение РОГ и указанные изменения позволяют снизить значения максимальных локальных температур рабочего тела в процессе сгорания примерно на 200 К (рис. 4, *б*) и обеспечить 7-кратное снижение суммарной за цикл эмиссии NO_x (рис. 5).

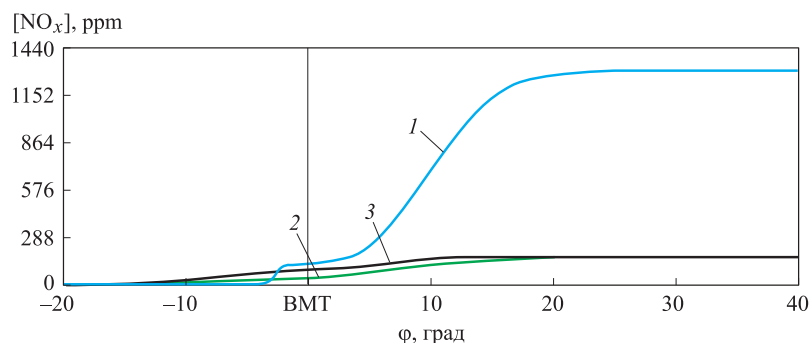


Рис. 5. Изменения суммарных содержаний оксидов азота:

1 — базовый (серийный процесс); 2 — модифицированный процесс ($z = 20\%$); 3 — частично гомогенное сгорание-1 ($z = 29\%$)

Раннее впрыскивание повышает вероятность преждевременного самовоспламенения [6], во избежание которого необходимо увеличивать степень РОГ до 45...60% [4, 6, 14]. Безусловно, такая большая доля отработавших газов в свежем заряде ухудшает эффективные показатели двигателя. В связи с этим было рассмотрено частично гомогенное сгорание-1 со стратегией раннего многократного впрыскивания и степенью РОГ $z = 29\%$. Во избежание попадания топлива на стенку КС уменьшены УКВТ до 100° и давление впрыскивания до $p_{\text{впр}} = 850$ бар (см. табл. 1). В этом процессе первые четыре впрыскивания топлива в цилиндр происходят задолго до ВМТ (угол опережения первого пилотного впрыскивания составляет 90° УПКВ), а последняя пятая порция впрыскивается в районе ВМТ.

Отметим, что аналогичный вариант частично гомогенного сгорания в экспериментальных работах [6, 7] не был предусмотрен.

Детальное исследование динамики струй топлива показало, что после начала впрыскивания ($\varphi = 266^\circ$) первой (пилотной) порции с продолжительностью подачи $\Delta\varphi_{\text{впр1}} = 6^\circ$ (см. рис. 1, б) часть топлива к моменту $\varphi = 279^\circ$ попадет на стенку цилиндра. К началу второго впрыскивания $\varphi = 288^\circ$ большая часть первой порции топлива успевает испариться. Во время второго впрыскивания часть топлива попадает как на стенку КС, так и в зазор между поршнем и цилиндром. Это приводит к повышению температуры в районе первого поршневого кольца (рис. 4, в), следовательно, и к росту термических напряжений. Кроме того, топливо, попавшее на зеркало цилиндра, вследствие низкой температуры стенки сгорает не полностью, тем самым увеличиваются выбросы несгоревших углеводородов. К началу третьей подачи топлива ($\varphi = 310^\circ$) поршень находится достаточно близко к ВМТ, поэтому струя не достигает стенки цилиндра. Продолжительность подачи $\Delta\varphi_{\text{впр3}} = 5^\circ$. Подача четвертой порции начинается в момент времени $\varphi = 330^\circ$ УПКВ (продолжительность подачи $\Delta\varphi_{\text{впр4}} = 5^\circ$), после окончания которой топливовоздушная смесь за время задержки воспламенения успевает практически равномерно распределиться по всему объему КС ($\varphi = 350^\circ$). Самовоспламенение смеси начинается к моменту подачи четвертой дозы топлива ($\varphi = 330^\circ$), когда температура в цилиндре высокая, а топливовоздушная смесь хорошо гомогенизирована.

По мере движения поршня к ВМТ значительная часть топлива, заключенная между плоской поверхностью поршня и поверхностью крышки цилиндра, перетекает в объем КС, расположенной в поршне. Подача пятой, заключительной порции топлива ($\varphi = 356^\circ$) аналогична процессу впрыскивания топлива в базовом (гетерогенном) дизельном процессе. Продолжительность топливopодачи составляет 10° УПКВ. Как будет показано далее, при впрыскивании пятой порции в объеме КС появляются области, обогащенные топливом, в которых вследствие низких локальных коэффициентов избытка воздуха начинается образование сажи. Эти области в основном расположены у поверхности поршня, где наблюдается накопление топлива.

Как следует из рис. 4, в, локальные температуры при частично гомогенном сгорании-1 имеют относительно низкий уровень и распределены более равномерно, чем в рассмотренных базовом и модифицированном процессах с гетерогенным сгоранием, что в конечном счете приводит к снижению эмиссии оксидов азота до уровня, имеющегося в модифицированном процессе (см. рис. 5). Заметное образование оксидов азота при частично гомогенном сгорании-1 начинается к моменту $\varphi = 350^\circ$, т. е. до начала подачи пятой, заключительной порции топлива. Несмотря на относительно большую величину этой дозы (начало подачи $\varphi = 356^\circ$), ее гетерогенное сгорание протекает медленно и приводит к незначительному повышению эмиссии оксидов азота по сравнению с модифицированным базовым процессом.

Следует подчеркнуть, что динамика изменения локальных концентраций оксидов азота в базовом (серийный без РОГ) и частично гомогенном (с РОГ $z = 29\%$) рабочих процессах дизеля OM 500 находится в четкой корреляции с динамикой изменения локальных температур в соответствующих процессах (см. рис. 4), что обусловлено термическим механизмом образования NO_x (2).

Влияние альтернативных рабочих процессов на образование сажи. Роль температуры в процессе образования сажи пока еще остается предметом дискуссий, поскольку высокая температура способствует как генерации сажи (пиролиз), так и ее аннигиляции (оксидация). Критическим считается интервал температуры $1500 \text{ K} < T < 1900 \text{ K}$ [2]. Выбросы сажи особенно ощутимы при малых значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha_v \leq 0,7$. На рис. 6 приведены мгновенные значения коэффициента использования воздуха λ (величина, обратная коэффициенту избытка воздуха $\lambda = 1/\alpha_v$) для разных моментов времени для серийного процесса и частично гомогенного сгорания-1.

Очевидно, что разность между углами конусности впрыскивания (см. табл. 1) приводит к заметному изменению распределения очагов генерации сажи по объему КС. Из рис. 7 следует, что очаги генерации сажи возникают в обогащенных топливом областях КС, где локальный коэффициент избытка воздуха имеет относительно малые значения. Следовательно, для уменьшения эмиссии сажи нужно добиться гомогенизации смеси, т. е. более равномерного распределения топлива в объеме КС, приводящего к значениям локальных коэффициентов избытка воздуха $\alpha_v \geq 1$.

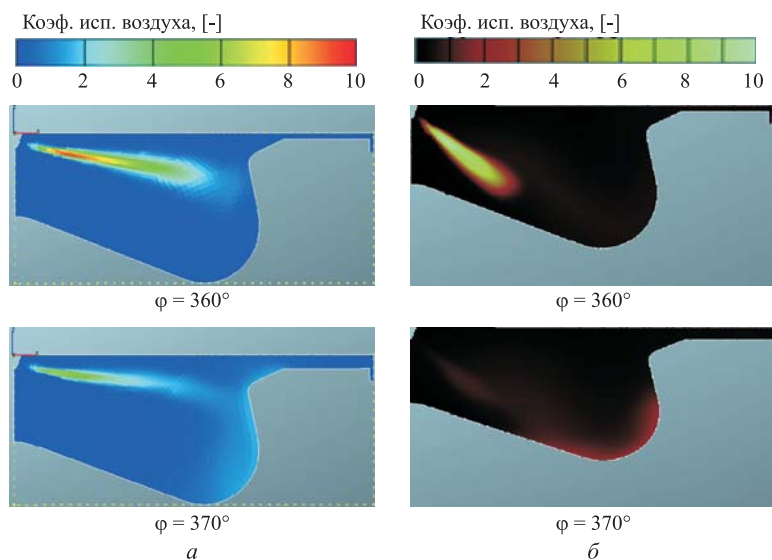


Рис. 6. Локальное значение коэффициента использования воздуха:
a — базовый процесс; *б* — частично гомогенное сгорание-1

Значительная часть сажи за процесс сгорания успевает выгореть, поэтому цикловой выброс сажи относительно небольшой и в серийном и модифицированном рабочих циклах составляет всего 9...10 ppm (рис. 8). При частично гомогенном сгорании-1, использование которого обычно имеет цель одновременного снижения эмиссии оксидов азота и сажи, содержание сажи по сравнению с серийным и модифицированным рабочими процессами существенно повышается.

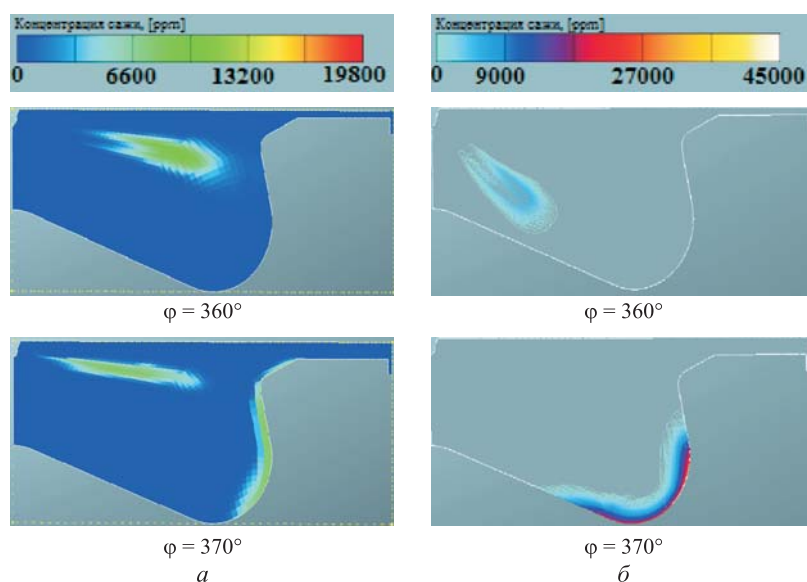


Рис. 7. Локальное значение концентрации сажи в КС:
a — базовый (серийный) дизельный процесс; *б* — частично гомогенное сгорание-1

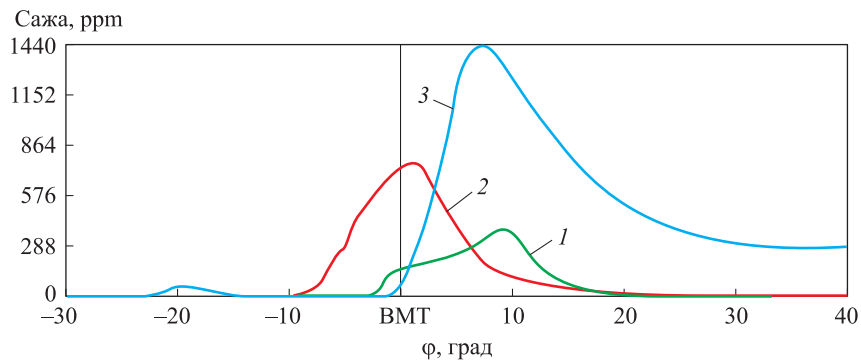


Рис. 8. Изменения содержания сажи в цилиндре:

1 — базовый (серийный) процесс; 2 — модифицированный процесс ($z = 20\%$); 3 — частично гомогенное сгорание-1 ($z = 29\%$)

Таким образом, рассмотренный вариант частично гомогенного сгорания, успешно решая проблему эмиссии оксидов азота, не справляется с проблемой эмиссии сажи. Объяснить этот факт можно на основе анализа изменения локальных параметров рабочего процесса. Действительно, в результате РОГ количество кислорода O_2 в цилиндре снижается, что приводит к уменьшению коэффициента избытка воздуха и увеличению числа зон в объеме КС с критическим значением коэффициента избытка воздуха, достаточным для образования сажи. В результате, сажи в модифицированном рабочем процессе с РОГ образуется почти в 2 раза больше, чем в серийном процессе без РОГ (см. рис. 8). Однако на завершающей стадии процесса сгорания большая доля генерированной сажи выгорает и цикловые выбросы сажи в этих процессах оказываются примерно одинаковыми.

При частично гомогенном сгорании-1 до подачи последней, пятой порции топлива локальный коэффициент использования воздуха равен 1–1,2 (коэффициент избытка воздуха соответственно 1–0,83). Поэтому в результате сгорания хорошо гомогенизированной смеси интенсивного образования сажи до ВМТ почти не наблюдается (момент времени $\varphi = 360^\circ$, рис. 7, б). Во время подачи пятой порции топлива на поверхности поршня наблюдается его накопление, поэтому коэффициент использования воздуха в этих пристеночных зонах, обогащенных топливом, увеличивается и равен 2 (момент времени $\varphi = 370^\circ$, см. рис. 7, б). Соответственно коэффициент избытка воздуха равен 0,5, вследствие чего интенсифицируется образование сажи. В результате анализа исследуемых вариантов дизельного процесса выявили, что процесс с частично гомогенным сгоранием-1 по выбросам сажи может конкурировать с серийным и модифицированными процессами при условии более равномерных и низких локальных температур в КС и при отсутствии локальных зон с малыми (критическими) значениями коэффициента избытка воздуха. Поскольку усиленное образование сажи происходит во время сгорания последней порции топлива, для уменьшения выбросов сажи необходимо изменить стратегию впрыскивания топлива.

С этой целью был рассмотрен другой вариант частично гомогенного сгорания-2 (см. рис. 1, в) также с 5-кратным впрыскиванием, однако с измененной характеристикой впрыскивания. При таком раннем впрыскивании уровень гомогенизации смеси по сравнению с частично гомогенным сгоранием-1 заметно увеличивается, однако повышается и вероятность преждевременного воспламенения, для предотвращения которого необходимо обеспечение высокой степени РОГ (в численных экспериментах ее значение составляло $z = 61\%$). Преимуществом такого процесса, безусловно, является одновременное снижение выбросов NO_x и сажи. Однако большая доля отработавших газов в составе свежего заряда заметно ухудшает эффективные показатели двигателя. Например, среднее эффективное давление в таком случае снижается почти на 40 % по сравнению с серийным процессом без РОГ (табл. 2).

Таблица 2

Результаты моделирования исследуемых рабочих процессов

Параметры двигателя	Базовый (серийный) процесс	Модифицированный процесс	Частично гомогенное сгорание	
			1	2
Среднее эффективное давление p_e , бар	5,95	5,36	4,22	3,6
$[\text{NO}_x]$, ppm	1291	178	182	14
Частицы сажи, ppm	9	9	288	2

Заключение. Совершенствование рабочего процесса в цилиндре поршневого двигателя — основной путь для разрешения «конфликта» или в крайнем случае поиска компромиссного сочетания между топливной экономичностью и экологичностью двигателя. Перспективным решением этой проблемы для дизелей является реализация процесса, обеспечивающего частичную гомогенизацию смеси и ее воспламенение от сжатия. В целях управления процессом частично гомогенного сгорания в дизелях, в частности для предотвращения преждевременного воспламенения, необходимо осуществление РОГ.

Потенциальные возможности предложенных методов улучшения экологических характеристик дизелей, основанных на использовании частично гомогенного сгорания и РОГ, следует оценивать с учетом их влияния на эффективные показатели двигателя. Многократное впрыскивание, увеличение количества сопловых отверстий распылителя и повышение давления впрыскивания, применяемые для осуществления частично гомогенного сгорания, обеспечивают интенсивное выгорание сажи, однако повышение локальных температур в объеме КС приводит к увеличению эмиссии оксидов азота. Для ограничения роста выброса NO_x рекомендуется применение РОГ с повышенной степенью. Дальнейшее снижение температурного уровня цикла и, как следствие, сокращение эмиссии оксидов азота возможно с уменьшением степени сжатия (в разумных пределах) и интенсификацией процессов смесеобразования и сгорания так, чтобы сохранить эффективные показатели двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавтарадзе З.Р., Кавтарадзе Р.З. Анализ механизмов образования и методов расчета концентрации оксидов азота в поршневых двигателях Ч. 1. Ч. 2. // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 5 (23). С. 65–71; № 6 (24). С. 12–19.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 590 с.
3. Reitz R.D., Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines // Progress in Energy and Combustion Science. 2015. Vol. 46. P. 12–71. DOI: 10.1016/j.pecs.2014.05.003
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128514000288>
4. Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // Теплофизика высоких температур. РАН. 2014. Т. 52. № 2. С. 294–309.
5. Noehre C., Anderson M., Johnson B., Hultqvist A. Characterization of partially premixed combustion. SAE Technical Paper 2006-01-3412. Lund University, 2006. 19 p.
6. Homogene Dieselerbrennung — Verfahren zur Emissionsreduzierung. Т. 2. Untersuchungen am Nfz-Motor / E. Müller, Ch. Weiskirch, E. Bach, Th. Emmrich, A. Schneemann // MTZ. 2006. Vol. 67. No. 11. P. 906–917. DOI: 10.1007/BF03225431
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03225431>
7. Schneemann A., Emmrich Th., Bach E. Oberflächentemperaturmessung und lokale Wärmeübergang // Informationstagung Motoren. Vol. R 535. Würzburg, 2006. P. 281–305.
8. FIRE. Users manual version 2016. Graz, Austria: AVL List GmbH, 2016.
9. Baulch D.L., Cobos C.I., Cox A.M. Compilation of rate data for combustion modeling. Suppl. I // J. Phys. Chem. 1994. Vol. 23. P. 847–859.
10. Frolov S.M., Basevich V.Y., Skripnik A.A. Modeling of soot formation in internal combustion engines // Международная конференция «Двигатель 2007». Сб. науч. трудов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 28–29.
11. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Sergeev S.S. The influence of rotational charge motion intensity on nitric oxide formation in gas-engine cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. No. 19–20. P. 4308–4316.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.060
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009002531>
12. Кавтарадзе Р.З. Улучшение экологических показателей водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 20–29.
13. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию / А.И. Леонтьев, Р.З. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, А.С. Голосов, С.А. Панкратов // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 1. С. 99–107. DOI: 10.7868/S0040364416010051
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0040364416010051>
14. Кавтарадзе Р.З., Зиновьев И.А. Влияние частичной гомогенизации процесса сгорания на экологические показатели дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 113–127. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-113-127

15. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зиновьев И.А., Голосов А.С. Влияние альтернативного процесса впрыскивания топлива на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 152–159.

Кавтарадзе Реваз Зурабович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бахрамов Эльшан Видади оглы — аспирант кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кавтарадзе Р.З., Бахрамов Э.В. Влияние гомогенизации рабочей смеси и рециркуляции отработавших газов на образование оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 2. С. 44–61.

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-44-61

EFFECT OF AIR-FUEL MIXTURE HOMOGENISATION AND EXHAUST GAS RECIRCULATION ON FORMATION OF NITROGEN OXIDES AND SOOT IN A DIESEL COMBUSTION CHAMBER

R.Z. Kavtaradze

kavtaradzerz@mail.ru

E.V. Bakhramov

elsbac@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We present the results of investigating work cycles of a high-speed diesel obtained by means of using a 3D model that considers formation kinetics for nitrogen oxides and soot, said model validated through experimental data. We analysed various work cycle concepts: the stock (basic) option featuring no exhaust gas recirculation, as well as a number of alternative ones: a modified stock one with added recirculation and altered injector nozzle design, and two options featuring partially homogeneous combustion involving fivefold fuel injection. We performed a comparative analysis of environmental performance and performance characteristics of the work cycle options under study, which makes it possible to evaluate their potential

Keywords

Diesel, 3D simulation, partially homogeneous combustion, exhaust gas recirculation, formation of nitrogen oxides and soot

Received 24.10.2017

© BMSTU, 2018

The study was supported by RFBR (grant no. 18-08-00275a)

REFERENCES

[1] The analysis of NO-formation and methods of calculation of NO-concentration in the piston engines working on traditional and alternative fuel. P. 1, p. 2. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2011, no. 5 (23), pp. 65–71; no. 6 (24), pp. 12–19 (in Russ.).

- [2] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of reciprocating engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016. 590 p.
- [3] Reitz R.D., Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, vol. 46, pp. 12–71. DOI: 10.1016/j.peccs.2014.05.003
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128514000288>
- [4] Kavtaradze R.Z., Sergeev S.S. New alternative (partially homogeneous) combustion process as a method for reduction of concentrations of nitric oxides and soot in combustion products of diesel. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 282–296. DOI: 10.1134/S0018151X14010106
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0018151X14010106>
- [5] Noehre C., Anderson M., Johnson B., Hultqvist A. Characterization of partially premixed combustion. SAE Technical Paper 2006-01-3412. Lund University, 2006. 19 p.
- [6] Müller E., Weiskirch Ch., Bach E., Emmrich Th., Schneemann A. Homogene dieselvebrennung — verfahren zur emissionsreduzierung. T. 2. Untersuchungen am Nfz-Motor. *MTZ*, 2006, vol. 67, no. 11, pp. 906–917. DOI: 10.1007/BF03225431
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03225431>
- [7] Schneemann A., Emmrich Th., Bach E. Oberflächentemperaturmessung und lokale Wärmeübergang. *Informationstagung Motoren*, vol. R 535. Würzburg, 2006, pp. 281–305.
- [8] FIRE. Users manual version 2016. Graz, Austria, AVL List GmbH, 2016.
- [9] Baulch D.L., Cobos C.I., Cox A.M. Compilation of rate data for combustion modeling. Suppl. I. *J. Phys. Chem.*, 1994, vol. 23, pp. 847–859.
- [10] Frolov S.M., Basevich V.Y., Skripnik A.A. Modeling of soot formation in internal combustion engines. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Dvigatel' 2007»*. Sb. nauch. trudov [Proc. Int. Conf. "Engine 2007"]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007, pp. 28–29 (in Russ.).
- [11] Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Sergeev S.S. The influence of rotational charge motion intensity on nitric oxide formation in gas-engine cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 19–20, pp. 4308–4316.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.060
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009002531>
- [12] Kavtaradze R.Z. Improving the ecological indices of a hydrogen diesel engine with direct gaseous hydrogen injection. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 307–315. DOI: 10.3103/S1052618816040051
Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1052618816040051>
- [13] Leont'yev A.I., Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Golosov A.S., Pankratov S.A. Improvement of piston engine operation efficiency by direct conversion of the heat of exhaust gases into electric energy. *High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 104–111.
DOI: 10.1134/S0018151X16010053
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0018151X16010053>
- [14] Kavtaradze R.Z., Zinov'yev I.A. Partial homogenization effect of the combustion process on the environmental performance of diesel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 4, pp. 113–127 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-113-127
- [15] Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zinov'yev I.A., Golosov A.S. Influence of the characteristic of multi-injection on local formations of nitrogen oxides and soot in the chamber of combustion of the diesel engine. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the RAS. Power Engineering], 2016, no. 5, pp. 152–159 (in Russ.).


Kavtaradze R.Z. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bakhramov E.V. — post-graduate student, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kavtaradze R.Z., Bakhramov E.V. Effect of Air-Fuel Mixture Homogenisation and Exhaust Gas Recirculation on Formation of Nitrogen Oxides and Soot in a Diesel Combustion Chamber. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 2, pp. 44–61 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-44-61



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография авторов
В.М. Кашина, В.Д. Свечарника, В.Л. Солунина, А.Б. Шаповалова

«Исследование процессов в приводе наведения установки в упрежденную точку на траектории»

Рассмотрены особенности работы приводов наведения установки в режиме слежения за упрежденной точкой на траектории. Исследованы статистические характеристики сигналов в системе наведения по результатам математического моделирования и по данным экспериментальных работ. Для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием систем управления.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru