

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

Р.З. Кавтарадзе

kavtaradzerz@mail.ru

И.А. Зиновьев

zinovievilia@gmail.com

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

Аннотация

Исследованы изменения локальных значений кинетической энергии турбулентности и температуры, а также их влияния на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля в случае базовой (двукратное (разделенное) впрыскивание топлива) и альтернативных (различные варианты пятикратного впрыскивания топлива) характеристик впрыскивания топлива. Определены оптимальные параметры впрыскивания топлива, приводящие к частично-гомогенному сгоранию на режиме неполной нагрузки. Установлено, что альтернативный процесс частично-гомогенного сгорания, оптимизированный на режимах неполной нагрузки, целесообразно совместить с традиционным дизельным сгоранием на номинальном режиме работы двигателя

Ключевые слова

Дизель, многократное впрыскивание, гомогенизация смеси, оксиды азота, сажа

Поступила в редакцию 22.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-08-01238а)

Прогресс, достигнутый в развитии современных дизелей, в частности в усовершенствовании внутрицилиндровых процессов, главным образом обусловлен внедрением аккумуляторной системы топливоподачи типа Common Rail, позволяющей формировать и управлять характеристикой топливоподачи в зависимости от режимов работы двигателя. Это особенно важно для улучшения экологических и эффективных показателей быстроходных транспортных дизелей, работающих в основном на режимах частичной нагрузки.

В настоящей работе исследуется применение альтернативных вариантов характеристик топливоподачи, отличающихся от базовой характеристики с разделенным впрыскиванием, применяемой на серийном дизеле. В качестве альтернативных используются характеристики топливоподачи с многократными за цикл впрыскиваниями топлива двух вариантов. При этом раннее впрыскивание первой (пилотной) порции топлива способствует гомогенизации смеси и улучшению экологических показателей двигателя.

Цель работы — исследование изменения локальных значений кинетической энергии турбулентности, температуры и их влияния на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля в случае базовой и альтернативных характеристик топливopодачи, а также выявление возможности улучшения экологических показателей дизеля посредством многократного за цикл впрыскивания.

Математическая модель рабочего процесса поршневого двигателя. Математическая модель рабочего процесса дизеля основана на трехмерных уравнениях нестационарного переноса: количества движения (Навье — Стокса), энергии (Фурье — Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности. После стандартной процедуры усреднения по Фавру эти уравнения принимают соответственно форму Рейнольдса [1–3]:

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

где $\bar{\rho} \overline{W'_i W'_j}$ — тензор рейнольдсовых турбулентных напряжений, определенный по пульсационным составляющим скорости; $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right)$ — тензор вязких (турбулентных) напряжений, определенный по осредненным значениям компонентов скорости; $c_p \bar{\rho} \overline{T' W'_j}$ — турбулентный перенос энтальпии посредством флуктуации скорости; $\bar{C}' W'_j$ — турбулентный диффузионный перенос массы компонента l , концентрацией C_l посредством флуктуации скорости W'_j (в (1) индекс l опущен). В уравнениях (1) используется правило суммирования по индексу ($i, j, k = 1, 2, 3$), повторяющемуся дважды. Кроме того, в (1) приняты следующие обозначения: $D/D\tau$ — субстанциональная производная; ρ — плотность газа; p — давление; G_i — проекция вектора плотности объемных сил на ось Ox_i прямоугольной декартовой системы координат; C — концентрация; H — полная удельная энергия; $V_\mu = \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div} \vec{W})$ — член, выражающий объемную деформацию; \vec{W} — вектор скорости газа; μ — динамическая вязкость; c_p — теплоемкость при постоянном давлении; w_r — скорость химической реакции на единицу объема; Q_r — количество выделяемой теплоты на единицу массы; λ — теплопроводность; δ_{ij} — символ Кронекера; D_c — коэффициент диффузии; \dot{m} — интенсивность ис-

точника массы (скорость изменения массы химической компоненты в единице объема).

Система уравнений Рейнольдса (1) содержит новые неизвестные (с турбулентными пульсациями параметров) и для ее замыкания используется (k - ε)-модель турбулентности [1–4]. Для описания течения рабочего тела в пристеночной области используются стандартные пристеночные функции, на основе которых универсальная безразмерная скорость u^+ определяется как функция от универсального, безразмерного расстояния от поверхности y^+ [2, 4]. Модели теплообмена в пристеночной области основаны на зависимостях, характеризующих распределение средней безразмерной температуры T^+ по толщине пограничного слоя y^+ .

Процесс турбулентного горения моделируется на основании модели СТМ (Characteristic Timescale Model) — модели, определяющей скорость реакции с применением временных масштабов ламинарных и турбулентных процессов. При этом временной масштаб ламинарного процесса определяется из выражения скорости реакции, записанного на основе закона Аррениуса, а турбулентного — как пропорциональная величина времени распада вихря, представляющего собой соотношение кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε . Концептуально СТМ-модель подобна известной модели Магнуссена — Хартагера [1, 4]. Инициирование сгорания происходит за счет ламинарных процессов, а после начала сгорания преобладает турбулентное перемешивание. Верификация СТМ-модели сгорания проведена на основе экспериментальных индикаторных диаграмм, полученных в [5, 6] на режиме частичной нагрузки $p_i = 6$ бар.

Параметры режима частичной нагрузки дизеля OM-500 (1ЧН 13/15)

| | |
|---|-------|
| Частота вращения коленчатого вала n , мин ⁻¹ | 1100 |
| Коэффициент избытка воздуха α_v | 3,17 |
| Цикловая подача топлива $m_{ц}$, г/цикл | 0,059 |
| Среднее индикаторное давление p_e , бар | 6 |

Локальные образования оксидов азота и твердых частиц сажи в камере сгорания моделируются с использованием расширенного термического механизма Зельдовича и стандартной кинетической модели образования сажи. Эти механизмы описаны в [1, 2, 4] и поддерживаются СТМ-моделью сгорания.

Численная реализация модели проводится с использованием (3D-CFD)-кода AVL FIRE, ориентированного на решение задач теории поршневых двигателей [4]. Ядро FIRE основано на численном методе контрольных объемов с использованием усовершенствованного алгоритма SIMPLE [1, 4]. Дискретизация уравнений переноса выполняется интерполяционной схемой второго порядка точности.

Технические данные исследуемого двигателя. Моделирование рабочего процесса было проведено для быстроходного дизеля OM-500 (Daimler-Benz),

одноцилиндровый отсек (1ЧН 13/15) которого подвергался детальным экспериментальным исследованиям [5, 6]. Результаты этих исследований были использованы для моделирования рабочего процесса, а также для верификации математической модели (1). Основные технические характеристики дизеля: диаметр цилиндра/ход поршня $D/S = 130/150$ мм/мм; степень сжатия $\epsilon = 14,7$; система топливоподачи — Common Rail; максимальное давление впрыскивания $p_{\text{впр}} = 1000$ бар; число и диаметр сопловых отверстий форсунки $8 \times 0,23$ мм. Приведенные далее результаты исследования относятся к работе дизеля ОМ-500 (1ЧН 13/15) на характерном режиме частичной нагрузки, параметры которого следующие: частота вращения коленчатого вала $n = 1100$ мин⁻¹, коэффициент избытка воздуха $\alpha_{\text{в}} = 3,7$; цикловая подача топлива $m_{\text{ц}} = 0,059$ г/цикл, среднее индикаторное давление $p_{\text{е}} = 6$ бар.

Базовая и альтернативные характеристики впрыскивания топлива. Отметим, что для всех использованных в исследовании характеристик впрыскивания топлива значение цикловой подачи сохранилось неизменным: $m_{\text{ц}} = \text{const}$. Это позволило определить наиболее оптимальный закон подачи топлива, обеспечивающий улучшение экологических показателей двигателя по сравнению с базовым дизелем. В целях усовершенствования рабочего процесса рассматриваются три характеристики впрыскивания (рис. 1) с условными названиями:

1) *СТМ-процесс* — процесс с применением СТМ-модели сгорания подразумевает двукратное разделенное впрыскивание, экспериментально исследованное в [5, 6], принятое в качестве базового процесса и используемое для верификации модели рабочего процесса;

2) *311-процесс* — рабочий цикл с пятикратным впрыскиванием: первые три порции топлива впрыскиваются на такте сжатия (начиная с момента $\varphi = 260^\circ$ по 5 % цикловой подачи топлива), четвертая порция подводится в виде растянутого пилотного впрыскивания (здесь и далее пилотная порция составляет 10 % цикловой подачи) и, наконец, пятая порция — основное впрыскивание, которое начинается до верхней мертвой точки (ВМТ) и заканчивается после ВМТ;

3) *(280–411)-процесс* — цикл с шестикратным впрыскиванием: первые четыре порции топлива впрыскиваются на такте сжатия, начиная с $\varphi = 280^\circ$ по 5 % цикловой подачи, пятая порция (10 % цикловой подачи) подводится в виде растянутого пилотного впрыскивания, а шестая, основная порция, подводится целиком после ВМТ.

Очевидно, что последние два процесса с довольно ранним впрыскиванием на такте сжатия приводят к частичной гомогенизации смеси, поэтому соответствующие им процессы сгорания следует отнести к частично-гомогенным процессам сгорания. Очевидно также, что характеристики впрыскивания оказывают существенное влияние на изменения локальных параметров рабочего тела в камере сгорания. В целях достоверности сравнительного анализа полученных результатов во всех трех случаях были использованы одни и те же модели турбулентности, горения и образования вредных веществ.

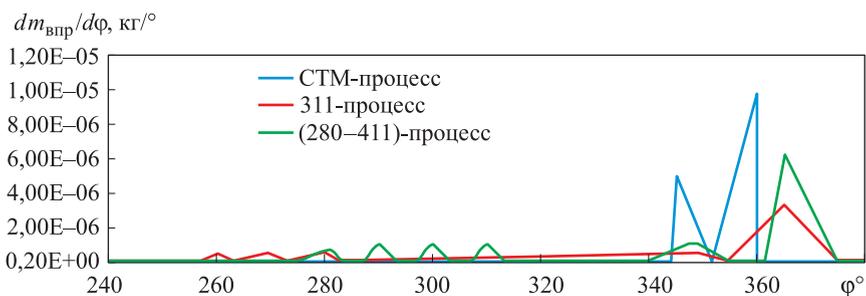


Рис. 1. Используемые при моделировании характеристики впрыскивания топлива

Верификация предложенной математической модели рабочего процесса была проведена путем сравнения расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм, что показало хорошее согласование: разность между расчетными и экспериментальными значениями максимальных давлений на рассматриваемом режиме частной нагрузки составляет $\sim 5 \dots 8$ %.

Анализ локальных значений кинетической энергии турбулентности. Основным преимуществом применяемой трехмерной, нестационарной модели (1) перед термодинамическими моделями [1, 2] является учет турбулентности во внутрицилиндровых теплофизических процессах поршневого двигателя. Кинетическая энергия турбулентности $k = \frac{\overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2}{2}$ оказывает существенное

влияние на процессы смесеобразования и сгорания в дизелях. Ее локальные значения играют важнейшую роль в распределении топлива и окислителя по объему цилиндра двигателя, в формировании локальных температур и в образовании локальных концентраций вредных веществ CO, HC, NO_x и сажи, а также локальных тепловых нагрузок на основные детали двигателя, составляющих камеру сгорания. С другой стороны, локальные значения кинетической энергии турбулентности в значительной степени зависят от интенсивности вихревого движения впускного воздуха, формы камеры сгорания в поршне, от характеристик впрыскивания топлива. На рис. 2 приведены осредненные по объему цилиндра значения этой энергии. Заметим, что для рассмотренных случаев характеристик впрыскивания топлива начальные значения интенсивности вихря воздуха, а также конструкция поршня не меняются. Характер изменения графика $k(\varphi)$, кроме перемещения поршня и геометрической конфигурации камеры сгорания, определяется в основном характеристикой впрыскивания (см. рис. 1). Поскольку топливо впрыскивается с высокой скоростью и под высоким давлением, процесс подачи топлива оказывает существенное влияние на характер изменения кинетической энергии турбулентности. Ее максимальное значение соответствует впрыскиванию основной порции топлива и воспламенению его отдельных долей в локальных очагах сгорания, возникающих практически одновременно по всему объему камеры сгорания (см. рис. 2).

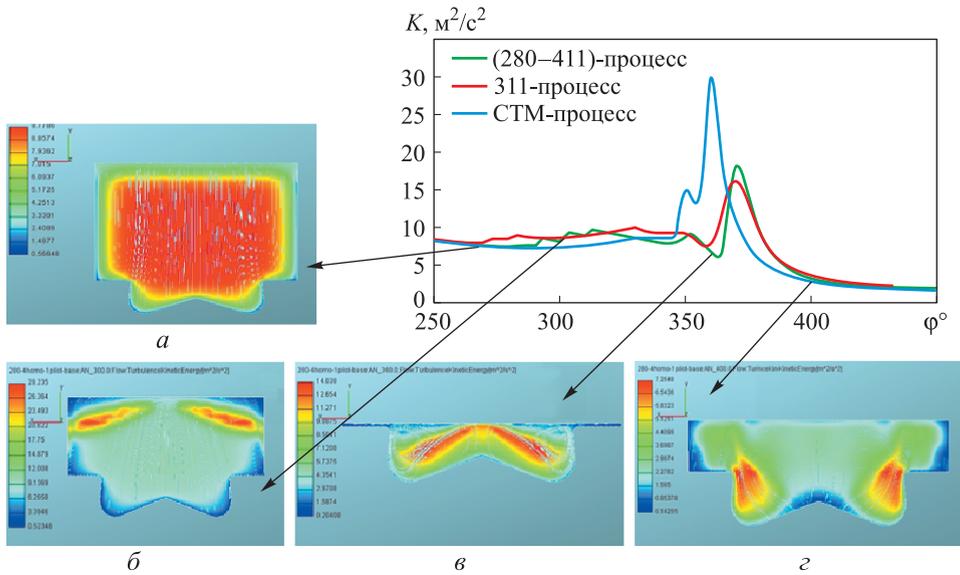


Рис. 2. Изменения средней (по объему цилиндра) кинетической энергии турбулентности рабочего тела в зависимости от характеристик впрыскивания; для (280–411)-процесса приведены мгновенные поля k при углах поворота коленчатого вала (п.к.в.) $\phi = 270^\circ$ (а); $\phi = 300^\circ$ (б); $\phi = 360^\circ$ (ВМТ) (в) и $\phi = 400^\circ$ (г)

Максимальное среднее значение кинетической энергии турбулентности ($k \approx 29 \text{ м}^2/\text{с}^2$) получается в случае традиционного гетерогенного процесса сгорания с разделенным впрыскиванием при нахождении поршня в ВМТ. В случае процессов с частичной гомогенизацией (311- и (280–411)-процессы) это значение снижается почти в 2 раза. Существенный сдвиг ($\sim 10^\circ$ п.к.в.) моментов времени, соответствующих максимальным значениям средней кинетической энергии турбулентности (см. рис. 2), указывает на возможность управления интенсивностью турбулентности в случае 311- и (280–411)-процессов с частично-гомогенным сгоранием.

Сравнение рис. 1 и 2 в целом указывает на корреляцию между характеристикой впрыскивания и изменением $k(\phi)$: двукратное (разделенное) впрыскивание почти с нулевым интервалом между двумя порциями топлива (СТМ-процесс, см. рис. 1) приводит к тому, что на графике $k(\phi)$ явно заметны два максимума, соответствующие повышению среднего уровня турбулентности в цилиндре в результате распространения двух последовательных топливных факелов. В случае частично гомогенных 311- и (280–411)-процессов изменения кинетической энергии турбулентности носят примерно одинаковый характер (см. рис. 2), однако, в (280–411)-процессе ее максимальное значение больше. Это объясняется тем, что в данном процессе скорость подачи топлива, влияющая на уровень турбулентности в цилиндре, почти в 2 раза больше, чем в 311-процессе (см. рис. 1).

Для оценки влияния характеристики впрыскивания топлива на осредненную по объему цилиндра кинетическую энергию турбулентности численные эксперименты были проведены без предварительной закрутки впускного воздуха, т. е. в начале сжатия, когда впускные и выпускные клапаны закрыты, воздух в цилиндре практически неподвижен, тем самым было исключено влияние интенсивности вихревого движения, генерированного впускным каналом. Подчеркнем, что другие причины турбулентности заряда в цилиндре, такие как закон перемещения поршня и геометрическая форма камеры сгорания, для всех трех исследуемых процессов впрыскивания и в данном случае оставались неизменными.

Поэтому, как это хорошо заметно на примере (280–411)-процесса, в процессе сжатия ($\varphi = 270^\circ$, см. рис. 2) локальные значения кинетической энергии турбулентности почти равномерно распределены в центральной части цилиндра (в ядре потока рабочего тела) и их максимальное значение составляет примерно $10 \text{ м}^2/\text{с}^2$. При этом направление линий тока определяется направлением движения поршня. В пристеночных слоях существенно влияние стенки на турбулентные пульсации, гашение которых приводит к уменьшению k . Средняя по объему цилиндра кинетическая энергия турбулентности к этому моменту времени составляет $k \approx 7 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

В процессе сжатия на турбулентность рабочего тела действуют два фактора: плотность газа (снижает уровень турбулентности) и интенсивность вихревого движения, вызванная формой камеры сгорания (наоборот, способствует усилению турбулентности). Под влиянием этих факторов в случае СТМ-процесса среднее значение k при сжатии меняется несущественно (см. рис. 2). В случае 311- и (280–411)-процессов заметно увеличивается среднее значение k , что вызвано разными предварительными впрыскиваниями (см. рис. 2), вносящими дополнительный вклад в турбулизацию рабочего тела в цилиндре. Максимальное значение локальной кинетической энергии турбулентности в области распространения струй топлива в случае (280–411)-процесса при $\varphi = 300^\circ$, например, составляет $\sim 29 \text{ м}^2/\text{с}^2$ при ее среднем значении $8,5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ($\varphi = 300^\circ$, см. рис. 2).

Интервал между предварительными и основными впрыскиваниями в случае частично-гомогенных процессов (311- и (280–411)-процессов) (см. рис. 2) приводит к уменьшению среднего значения k . Например, в случае (280–411)-процесса при $\varphi = 363^\circ$ достигается минимальное значение $k = 5,93 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (см. рис. 2). Отметим, что максимальные значения локальных k при нахождении поршня в ВМТ для этого же процесса впрыскивания равны примерно $14 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (см. рис. 2, $\varphi = 360^\circ$).

В процессе расширения средние значения k для всех трех процессов выравниваются и уже при $\varphi = 400^\circ$ уменьшаются до $\sim 3 \text{ м}^2/\text{с}^2$, т. е. менее чем в процессах впуска и сжатия. При этом максимальные значения локальных k тоже небольшие (для (280–411)-процесса, например, $\sim 7 \text{ м}^2/\text{с}^2$, см. рис. 2) и наблюдаются в области кромки камеры сгорания, расположенной в поршне. Такое существенное снижение уровня турбулентности в процессе расширения после $\varphi = 400^\circ$ объясняется тем, что к этому времени сгорание практически закончи-

лось и возмущения в рабочем теле вызываются только движением поршня и геометрической формой камеры сгорания.

Изменение локальных температур рабочего тела в цилиндре. Очевидно, что изменение законов впрыскивания топлива (см. рис. 1) приводит к изменению скорости тепловыделения в камере сгорания, вследствие чего меняются и средняя по объему цилиндра температура рабочего тела и его давление. Следовательно, в зависимости от закона впрыскивания топлива и уровня гомогенизации смеси меняется динамика изменения локальных температур рабочего тела. На рис. 3 приведены поля локальных температур рабочего тела в камере сгора-

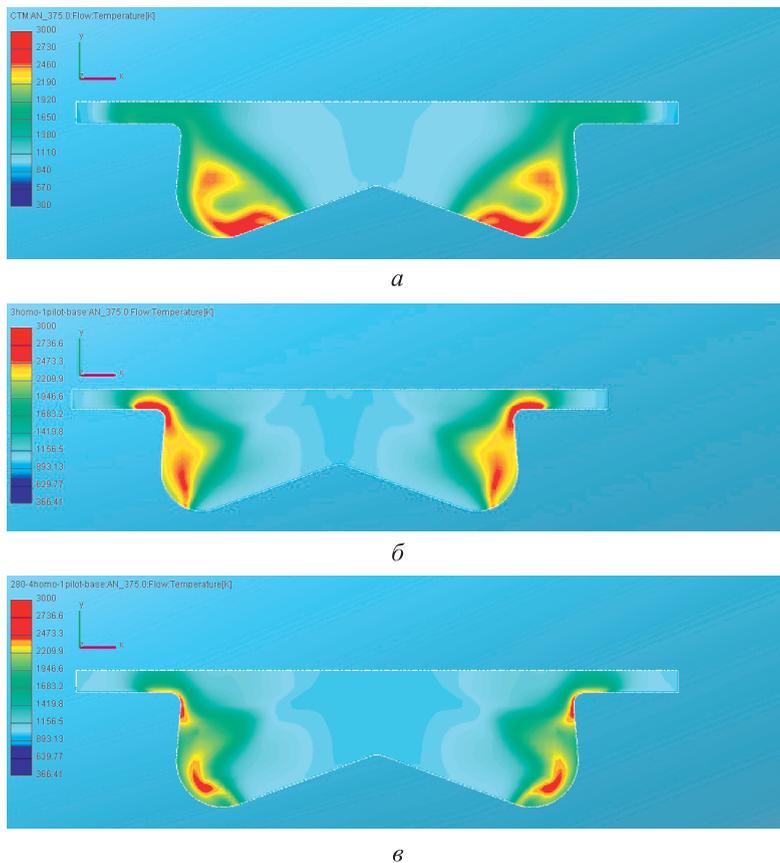


Рис. 3. Локальные температуры в цилиндре при $\varphi = 375^\circ$ в зависимости от характеристики впрыскивания для СТМ-, 311- и (280–411)-процессов (а, б, в соответственно)

ния дизеля для различных характеристик впрыскивания топлива для момента времени $\varphi = 375^\circ$, примерно соответствующего максимальному значению средней по объему цилиндра температуры для рассмотренных вариантов топливоподачи (см. рис. 1).

В случае СТМ-процесса впрыскивания уже при нахождении поршня в ВМТ ($\varphi = 360^\circ$) в нижней части камеры сгорания заметны очаги сгорания с высокими

температурами ($T \approx 2400$ К), способствующими образованию оксидов азота. При частичной гомогенизации смеси 311- и (280–411)-процессы впрыскивания топлива к этому моменту времени локальные температуры меньше предела ($T < 1800$ К), без превышения которого образование термических оксидов азота практически не происходит. Более того, в случае (280–411)-процесса локальные температуры достигают это предельное значение позже — при $\varphi = 370^\circ$. При $\varphi = 375^\circ$ локальные температуры в случае СТМ-процесса принимают значения $T \approx 2700$ К и более, в случае 311- и (280–411)-процессов с частичной гомогенизацией смеси их значения заметно меньше ($T \approx 2400$ К и $T \approx 2200$ К, см. рис. 3). Отметим, что область высоких температур при частичной гомогенизации смеси сужается, при этом для (280–411)-процесса она меньше, чем для 311-процесса. Кроме того, в альтернативных процессах с частично-гомогенным сгоранием высокотемпературные зоны расположены в области кромки поршня, а в базовом процессе такие зоны сосредоточены в области дна камеры сгорания. При этом перемещение высокотемпературных зон к области кромки поршня особенно заметно на стадии диффузионного сгорания, что объясняется интенсификацией турбулентности, в частности повышенными значениями кинетической энергии турбулентности в этих зонах.

Анализ локальных и суммарных образований оксидов азота и сажи в камере сгорания. В зависимости от характеристики впрыскивания топлива, кроме локальных параметров, прежде всего, локальной кинетической энергии турбулентности, изменяется и период задержки воспламенения [7, 8], который влияет на скорость нарастания давления в начальной фазе сгорания. Это, как было отмечено ранее, влияет на изменение как осредненных по объему цилиндра температур, так и локальных температур в отдельных зонах камеры сгорания, играющих решающую роль в образовании оксидов азота и сажи.

Концентрационные поля оксидов азота в объеме камеры сгорания (рис. 4) коррелируются с температурными полями рабочего тела (см. рис. 3), что, конечно, объясняется термическим механизмом образования NO_x . Заметно значительное сокращение зон с высокой концентрацией оксидов азота в случае (280–411)-процесса. В целом в результате анализа динамики изменения локальных температур и локальных концентраций оксидов азота выявлено, что увеличение степени гомогенизации ведет к снижению локальных температур (при примерном сохранении уровня средних по камере сгорания температур). Такое более равномерное распределение локальных температур по объему цилиндра обуславливает снижение концентрации оксидов азота, особенно в случае (280–411)-процесса.

Как известно, в классическом дизельном процессе не стоит проблема гомогенизации смеси и образование сажи сопутствует гетерогенному процессу сгорания [9–11]. Процесс образования сажи в камере сгорания для исследуемых процессов с частично-гомогенным сгоранием протекает несколько по-другому (рис. 5). Во всех трех исследуемых случаях впрыскивания топлива первые очаги образования сажи возникают в центральной части камеры сгорания в зонах

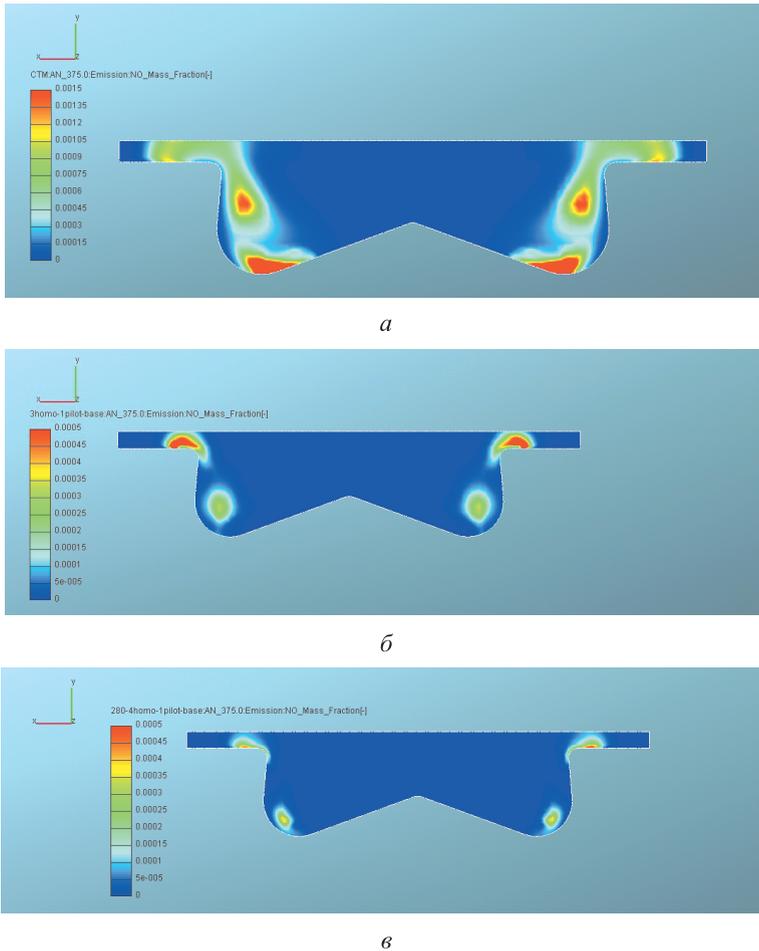
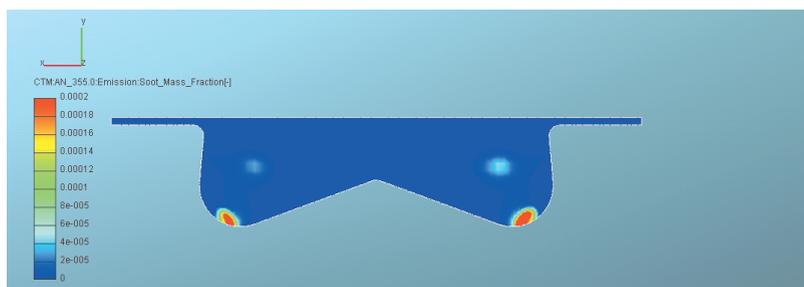
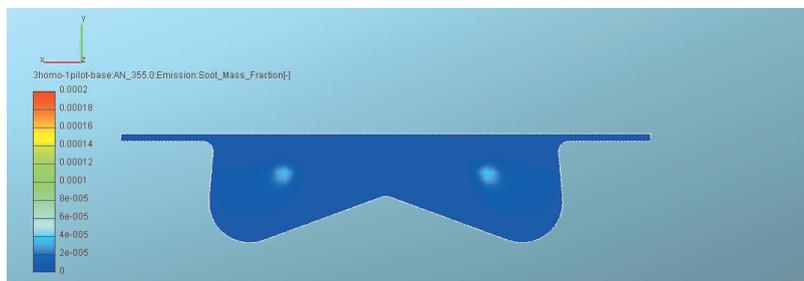


Рис. 4. Локальные концентрации (массовые доли) оксидов азота в цилиндре при $\varphi = 375^\circ$ в зависимости от характеристики впрыскивания (*a*, *б*, *в* — см. рис. 3)

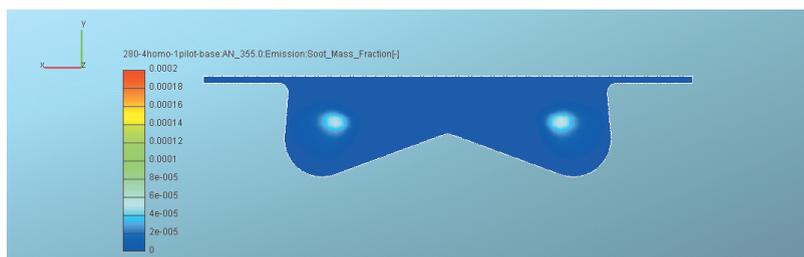
распространения струи топлива. В случае базового СТМ-процесса впрыскивания топлива очаги образования сажи появляются раньше, что обусловлено ранним впрыскиванием основной порции топлива (см. рис. 1) и, соответственно, ранним основным тепловыделением по сравнению с частично-гомогенными 311- и (280–411)-процессами. Правда, в этих процессах горение начинается воспламенением первых пилотных доз топлива, однако они, а также другие последующие за ними небольшие дозы топлива горят в условиях относительно низких локальных температур и высоких локальных коэффициентов избытка воздуха. Таким образом, в частично-гомогенных процессах до впрыскивания основной порции топлива заметное образование сажи отсутствует. После впрыскивания основной дозы топлива с развитием процесса сгорания для базового СТМ-процесса зона интенсивного образования сажи наблюдается в районе дна камеры сгорания (см. рис. 5), а для процессов с частично-гомогенным сгоранием она перемещается ближе к боковым стенкам камеры.



а



б



в

Рис. 5. Локальные концентрации (массовые доли) сажи в цилиндре при $\varphi = 375^\circ$ в зависимости от характеристики впрыскивания (а, б, в — см. рис. 3)

В целом можно предположить, что значительная доля сажи образуется в относительно холодных зонах стенки с низкими локальными коэффициентами избытка воздуха. Несмотря на принципиальное отличие динамики выделения сажи (см. рис. 5) в базовом и альтернативном процессах, суммарные за цикл доли сажи в отработавших газах в случае частично-гомогенных процессов остаются примерно на таком же уровне, что для базового СМТ-процесса.

Заключение. Применение альтернативного, многократного впрыскивания с ранним пилотным впрыскиванием на такте сжатия приводит к частичной гомогенизации топливно-воздушной смеси и способствует снижению локальных образований оксидов азота и сажи в камере сгорания. Уровень турбулентности оказывает существенное влияние на распределение топлива и окислителя по объему цилиндра двигателя, на формирование локальных термодинамических параметров рабочего тела и образование локальных концентраций оксидов азота и сажи.

Установлено, что предложенные альтернативные характеристики впрыскивания, способствующие частично-гомогенному процессу сгорания в дизеле, обеспечивают лучшие экологические показатели по сравнению с серийным дизелем с двукратной (разделенной) характеристикой впрыскивания.

На основе анализа характеристик впрыскивания определены оптимальные значения параметров топливоподачи, обеспечивающих частично-гомогенное сгорание для исследуемого дизеля на режиме частичной нагрузки: четыре предварительные порции топлива (по 5 % цикловой подачи, первая порция впрыскивается при $\varphi = 280^\circ$), пилотная порция (10 %) и основная порция. Такая характеристика подачи топлива, обозначенная как (280–411)-процесс, обеспечивая частично-гомогенное сгорание на режиме частичной нагрузки, позволяет снизить суммарную за цикл массовую долю оксидов азота с $[\text{NO}_x] = 0,00044$ (для серийного дизеля с базовым СТМ-процессом) до $[\text{NO}_x] = 0,00023$. Отметим, что другой частично-гомогенный 311-процесс также уменьшает этот показатель до $[\text{NO}_x] = 0,00029$. Кроме того, (280–411)-процесс по сравнению с другими процессами приводит к снижению скорости нарастания давления в начальной фазе сгорания и, как следствие, к уменьшению шума дизеля. Суммарные за цикл значения концентрации сажи для исследуемых частично-гомогенных процессов остаются практически на одинаковом уровне и несущественно отличаются от базового СТМ-процесса. В целях дальнейшего снижения выбросов сажи рекомендуется применение рециркуляции отработавших газов, а также использование возможности дополнительного (после основного) впрыскивания небольших порций топлива на такте расширения. Для обеспечения приемлемых экологических показателей дизеля для всего спектра режимов его работы целесообразно процессы частично-гомогенного сгорания, оптимизированные на частичных режимах нагрузки, совместить с традиционным дизельным сгоранием на номинальном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
2. Merker G., Schwarz Ch., Teichmann R. (Hrsg.). Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 6. Auflage. Vieweg Teubner-Verlag/Springer Fachmedien. Wiesbaden GmbH, 2014. 795 s.
3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 85 с.
4. FIRE. Users Manual Version 2014. AVL List GmbH. Graz. Austria, 2014.
5. Schneemann A., Emmrich Th., Bach E. Oberflächentemperaturmessung und lokale Wärmeübergang // Informationstagung Motoren. Herbst 2006. Würzburg. Heft R 535. 2006. S. 281–305.
6. Homogene dieselerbrennung — verfahren zur emissionsreduzierung. Teil 2: Untersuchungen am Nfz-Motor / E. Müller, Ch. Weiskirch, E. Bach, Th. Emmrich, E. Bach, A. Schneemann // MTZ. 2006. No. 11. S. 906–917.

7. Kavtaradze R.Z., Natriashvili T.M., Zelentsov A.A. Ignition delay and emission of the noxious substances in double-fuel engines working on the natural gas and syngases // Chapter 15 (p. 109–120) in the Book: Innovative methods for improvement of technical, economic and ecological efficiency of motor Ca8. New York, NOVA-Publishers., 2015. 138 p.
8. Кавтарадзе Р.З., Цайлингер К., Цитцлер Г. Задержка воспламенения в дизеле при использовании различных топлив // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 6. С. 947–965.
9. Heat insulating effect of soot deposit on local transient heat transfer in diesel engine combustion chamber / R. Kavtaradze, A. Zelentsov, S. Gladyshev, Z. Kavtaradze, D. Onishchenko // SAE International Paper. 2012. No. 2012-01-1217. 12 p.
10. Расчет радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания дизеля / Р.З. Кавтарадзе, А.И. Гайворонский, В.А. Федоров, Д.О. Онищенко, А.В. Шибанов // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 5. С. 741–748.
11. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А. Влияние формы впускных каналов на эффективные и экологические показатели среднеоборотного дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 6. С. 59–73. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-59-73

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).

Зиновьев Илья Александрович — инженер НОЦ «Формула-студент» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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

PARTIAL HOMOGENIZATION EFFECT OF THE COMBUSTION PROCESS ON THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF DIESEL

R.Z. Kavtaradze

kavtaradzerz@mail.ru

I.A. Zinovev

zinovievilia@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the research was to examine the changes in the local values of turbulent kinetic energy and temperature, as well as their impact on the local formation of nitrogen oxides and soot in diesel engine combustion chamber in the case of the base (two-fold (split) fuel injection) and alternative (different variants of five-fold fuel injection) fuel injection characteristics. We defined the optimum parameters of the fuel injection, resulting in a partially homogeneous combustion in part load mode. We found that it is appropriate to combine an alternative process of partially homogeneous combustion optimized in part load modes, with the conventional diesel combustion in normal engine duty

Keywords

Diesel, repeated injection, mixture homogenization, nitrogen oxides, soot

REFERENCES

- [1] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spets. glavy [Theory of piston engines. special chapters]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2008. 720 p.
- [2] Merker G., Schwarz Ch., Teichmann R. (Hrsg.). Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 6. Auflage. Vieweg Teubner-Verlag/Springer Fachmedien, Wiesbaden GmbH. 2014. 795 s.
- [3] Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A. Trekhmernoe modelirovanie nestatsionarnykh teplofizicheskikh protsessov v porshnevnykh dvigatelyakh [Three-dimensional modeling of unsteady thermal processes in piston engines]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2012. 85 p.
- [4] FIRE. Users Manual Version 2014. AVL List GmbH, Graz. Austria, 2014.
- [5] Schneemann A., Emmrich Th., Bach E. Oberflächentemperaturmessung und lokale Wärmeübergang. *Informationstagung Motoren*. Herbst 2006, Würzburg. Heft R 535, 2006, ss. 281–305.
- [6] Müller E., Weiskirch Ch., Bach E., Emmrich Th., Bach E., Schneemann A. Homogene dieselerbrennung – verfahren zur emissionsreduzierung. Teil 2: Untersuchungen am Nfz-Motor. *MTZ*, 2006, no. 11, ss. 906–917.
- [7] Kavtaradze R.Z., Natriashvili T.M., Zelentsov A.A. Ignition delay and emission of the noxious substances in double-fuel engines working on the natural gas and syngases. Chahter 15 (pp. 109–120) in the Book: Innovative methods for improvement of technical, economic and ecological efficiency of motor cars (ISBN: 978-1-63463-671-1). N. Y., NOVA-Publishers., 2015. 138 p.
- [8] Kavtaradze R.Z., Zeilinger R., Zitzler G. Ignition delay in a diesel engine utilizing different fuels. *High Temperature*, 2005, vol. 43, no. 6, pp. 951–960.
- [9] Kavtaradze R., Zelentsov A., Gladyshev S., Kavtaradze Z., Onishchenko D. Heat insulating effect of soot deposit on local transient heat transfer in diesel engine combustion chamber. *SAE International Paper*, 2012, no. 2012-01-1217. 12 p.
- [10] Kavtaradze R.Z., Gaivoronskii A.I., Fedorov V.A., Onishchenko D.O., Shibanov A.V. Calculation of radiative-convective heat transfer in the combustor of diesel engine. *High Temperature*, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 673–680.
- [11] Kavtaradze R.Z., Zelentsov A.A. Influence of intake port shape on effective and ecological parametres of middle-speed diesel engine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 6, pp. 59–73 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-59-73

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

Zinovev I.A. — engineer of Scientific Educational Center Formula-Student, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kavtaradze R.Z., Zinovev I.A. Partial Homogenization Effect of the Combustion Process on the Environmental Performance of Diesel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 113–127. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-113-127