



На правах рукописи

УДК 621.434:536.24

Сергеев Сергей Сергеевич

**СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА И САЖИ
В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЯ
ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

27 ОКТ 2011

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кавтарадзе Реваз Зурабович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Марков Владимир Анатольевич

кандидат технических наук
Федоров Вадим Анатольевич

Ведущее предприятие: Научно-производственное и технологическое
предприятие «Агродизель»

Защита диссертации состоится 10 сентября 2011г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д.2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.09.

Автореферат разослан « 7 » сентября 2011г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к. т. н., доцент

Тумашев Р.З.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Улучшение экологических характеристик – одна из главных задач современного транспортного дизелестроения. Экологические показатели дизеля определяются, прежде всего, уровнем выбросов оксидов азота и твердых частиц сажи. Эти компоненты отработавших газов (ОГ) являются наиболее токсичными и опасными для здоровья человека. Внутрицилиндровая минимизация образования оксидов азота и сажи – обязательное условие выполнения актуальных и перспективных экологических стандартов по содержанию вредных веществ в выпускных газах дизелей. Большое значение при оптимизации рабочего процесса дизеля с целью минимизации внутрицилиндровых образований оксидов азота и сажи имеет математическое моделирование, позволяющее сократить временные и материальные затраты при создании новых и доводке существующих двигателей.

Цель работы: Исследование возможностей одновременного снижения концентрации оксидов азота и сажи в продуктах сгорания автомобильного дизеля без применения систем дополнительной очистки ОГ.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка математической модели рабочего процесса дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива;
2. Моделирование образования оксидов азота и сажи в камере сгорания (КС) дизеля;
2. Верификация математической модели на основе экспериментальных данных;
3. Определение значений конструктивных и регулировочных параметров, позволяющих одновременно снизить концентрацию оксидов азота и сажи в ОГ исследуемого дизеля с целью соответствия эмиссий этих компонентов актуальным экологическим стандартам;
4. Исследование альтернативных процессов сгорания для дальнейшего улучшения экологических показателей.

Научная новизна:

- моделирование образований оксидов азота и сажи осуществляется с учетом трехмерных нестационарных течений во впускной системе, при этом форма впускных каналов подобрана таким образом, что обеспечивается зарядка свежего заряда с требуемой интенсивностью;

- установлено оптимальное сочетание конструктивных и регулировочных параметров, позволяющих одновременно снизить эмиссию оксидов азота и сажи;

- исследована возможность одновременного снижения эмиссии оксидов азота и сажи за счет организации альтернативного (частично-гомогенного) процесса сгорания.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется:

- использованием фундаментальных законов и уравнений теплофизики, химической физики, гидро- и газодинамики с соответствующими граничными условиями, современных численных методов реализации математических моделей;

- применением достоверных опытных данных по исследованию процессов сгорания и образования вредных веществ в цилиндре дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработан инструмент, позволяющий прогнозировать с достаточной точностью значения концентрации оксидов азота и сажи в ОГ быстроходного дизеля, и оценивать соответствие этих эмиссий различным экологическим стандартам на стадии проектирования новых, а также при доводке существующих дизелей;

- определены значения конструктивных и регулировочных параметров, обеспечивающих одновременное снижение концентраций оксидов азота и сажи в выпускных газах исследуемого дизеля до значений, допускаемых экологической нормой Евро-4, без применения систем дополнительной очистки ОГ;

- предложен вариант альтернативного процесса сгорания, позволяющий практически полностью устранить эмиссию оксидов азота, а также значительно снизить эмиссию сажи по отношению к классическому дизельному процессу.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на:

- Международных научно-технических конференциях «3-, 4-, 5-ые Лужанские чтения. Решение энергэкологических проблем в автотранспортном комплексе», Москва, МАДИ, в 2007, 2009, 2011 гг.

- XVI, XVII, XVIII Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под рук. академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», в 2007г.(Санкт-Петербург, СПбГПУ), 2009 г. (г.Жуковский, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского), в 2011г.(г. Звенигород).

- Пятой Российской Национальной Конференции по Теплообмену, 2010г., Москва (диплом за лучший доклад).

- Юбилейной научно-технической конференции «Двигатель-2010», посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации: основные положения диссертации опубликованы в 12 научных работах, из них по Перечню ВАК – 3.

Объем работы: диссертационная работа содержит 134 страницы машинописного текста, 65 рисунков, 13 таблиц, состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 91 наименований (67 из них на иностранном языке).

Значительная часть проведенных исследований выполнялась в рамках грантов РФФИ: № 05-08-01311, №08-08-00348, №09-08-00279.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении изложена общая характеристика диссертационной работы (см. выше)

В первой главе проведен анализ работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию образования оксидов азота и сажи в КС дизеля, выполненных отечественными и иностранными исследователями, среди которых: Звонов В.А., Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Кульчицкий А.Р., Марков В.А., Патрахальцев Н.Н., Скрипник А.А., Фролов С.М., Хачиян А.С., Boulouchos K., Reitz R., Merker G., Pischinger R., Priesching P., Tatschl R. и ряд других ученых.

На основе проведенного анализа работ по заданной тематике была поставлена цель диссертационной работы и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения (см. выше).

Вторая глава посвящена разработке математической модели для расчета образования оксидов азота и сажи в цилиндре дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива. Дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие физические процессы переноса массы, количества движения и энергии, можно представить в виде закона сохранения, выраженного обобщенным дифференциальным уравнением. В декартовой системе координат это уравнение можно представить в тензорной форме:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi, \quad j=1, 2, 3; \quad (1)$$

где Φ – произвольная зависимая переменная; W – скорость газа; ρ – плотность газа; Γ_Φ – коэффициент обмена (диффузии); S_Φ – источниковый член, который в общем случае можно представить как разность генерации S_{Φ_g} и аннигиляции S_{Φ_a} потоков, т.е. $S_\Phi = S_{\Phi_g} - S_{\Phi_a}$. Конкретный вид Γ_Φ и S_Φ , а также S_{Φ_g} и S_{Φ_a} зависит от физического смысла переменной Φ . В (1) и в таблице используется правило суммирования слагаемых при повторении индексов i, j, k .

Для моделирования турбулентных течений используется подход, предложенный О. Рейнольдсом, согласно которому мгновенное значение любого параметра потока Φ представляется как сумма его усредненного по времени $\bar{\Phi}$ и пульсационного Φ' значений. Для определения усредненной составляющей используется метод Фавра (Favre).

Таким образом, исходная система уравнений переноса заменяется незамкнутой системой усредненных по Фавру уравнений в форме Рейнольдса (табл.1).

Для замыкания этой системы используется k - ζ - f модель турбулентности, относящаяся к категории моделей вихревой вязкости и состоящая из трех уравнений переноса – известных уравнений для k (кинетической энергии турбулентности) и для ϵ (скорости диссипации кинетической энергии турбулентности), а также уравнения для нормированного масштаба скорости $\zeta = W^2/k$:

$$\rho \frac{D\zeta}{D\tau} = \rho f - \rho \frac{\zeta}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\zeta} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right], \quad (2)$$

где f – эллиптическая функция релаксации.

Важным достоинством модели является возможность хорошего описания отрывных течений по сравнению, например, с k - ϵ моделью турбулентности.

Таблица 1.

Уравнения законов сохранения, как частные случаи обобщенного дифференциального уравнения (2)

Значение переменных	Вид уравнений
$\Phi = W_i, \Gamma_\Phi = \mu,$ $S_\Phi = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + V_\mu$	Уравнение сохранения количества движения (уравнение Навье-Стокса): $\frac{\partial}{\partial \tau} \overline{\rho W_i} = \overline{G_i} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{W_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{W_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \overline{W_k}}{\partial x_k} \right) - \overline{\rho W_i W_j} \right]$ $(i, j, k = 1, 2, 3)$
$\Phi = h, \Gamma_\Phi = \frac{\lambda}{c_p},$ $S_\Phi = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} W_j) + \rho G_j W_j - w_r Q_r - \nabla q_R$	Уравнение сохранения энергии: $\frac{\partial \overline{D H}}{\partial \tau} = \overline{G_j W_j} + \frac{\partial \overline{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij} W_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} - c_p \overline{\rho T' W_j'} \right) + \overline{w_r Q_r} + \frac{\partial \overline{q_{Rj}}}{\partial x_j}$
$\Phi = 1, \Gamma_\Phi = 0,$ $S_\Phi = 0$	Уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности): $\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho W_j}) = 0$
$\Phi = \frac{C_l}{\rho}, \Gamma_\Phi = D_l \rho,$ $S_\Phi = \dot{m}_l$	Уравнение диффузии (концентрации): $\frac{D \overline{C}}{D \tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_j} - \overline{C W_j} \right) + \overline{\dot{m}} \quad (i, j, k = 1, 2, 3)$

Расчет процесса впрыскивания основан на статистическом методе дискретных капель (Discrete Droplet Method), базирующемся на решении обыкновенных дифференциальных уравнений для динамики, нагрева и испарения отдельных капель топлива.

Для моделирования процесса турбулентного сгорания топлива используется известная и хорошо апробированная модель Магнуссена-Хартагера (Magnussen-Hjertager). В этой модели предполагается мгновенное сгорание топливовоздушной смеси, поэтому средняя скорость горения \bar{w}_r определяется временем турбулентного перемешивания реагентов и записывается в следующем виде:

$$\bar{w}_r = \frac{A}{\tau_t} \rho \min\left(\bar{m}_T, \frac{\bar{m}_{O_2}}{L_0}, B \frac{\bar{m}_{np.сж.}}{1 + L_0}\right), \quad (3)$$

где \bar{m}_T , \bar{m}_{O_2} , $\bar{m}_{np.сж.}$ - среднее значение масс реагентов (топлива и кислорода) и продуктов сгорания соответственно; L_0 - массовое стехиометрическое количество воздуха; $\tau_t = \bar{k} / \bar{\epsilon}$ - время турбулентного перемешивания; A и B - эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние параметров турбулентности и вида топлива на скорость химической реакции. Значение коэффициента A для конкретного случая было уточнено в соответствии с экспериментальными данными (см. ниже). Значение второго коэффициента постоянно и для дизельного топлива составляет $B=1$.

Для расчета процесса сажеобразования использовалась кинетическая модель, предложенная проф. С.М. Фроловым. Для моделирования образования оксидов азота рассматривается расширенный механизм Зельдовича.

Численная реализация модели осуществляется в CFD-коде Fire фирмы AVL List GmbH (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E.Bauman and AVL List GmbH, 2010).

В качестве базового двигателя рассматривается быстроходный дизель ЗМЗ 5145.10, предназначенный для установки на легковые и легкие грузовые автомобили с полной массой не более 3.5 тонн.



Рис. 1. Поле скоростей в процессе такта наполнения (НМТ)

Для проведения численных исследований рассматриваются три режима работы двигателя: режим номинальной мощности ($N_e=85$ кВт, $n=4000$ мин⁻¹), режим максимального крутящего момента ($M_k=265$ Н·м, $n=2000$ мин⁻¹) и режим частичной нагрузки ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹).

Важной особенностью математической модели является учет трехмерных нестационарных течений во впускной системе, что позволяет получить реальные поля локальных параметров рабочего тела в начале такта сжатия. Для учета этих течений создана концептуальная модель системы «впускные каналы-цилиндр», характеризующаяся комбинацией спирального и тангенциального впускных ка-

налов (рис.1), обеспечивающих закрутку впускного воздуха с вихревым отношением $D_n \approx 1$ (на момент закрытия впускных клапанов - 580° ПКВ). Здесь $D_n = n_s/n$ (n_s - частота вращения вихря впускного воздуха, n - частота вращения коленчатого вала двигателя).

Для подтверждения целесообразности учета впускной системы, при моделировании образования оксидов азота и сажи в цилиндре исследуемого дизеля, были выполнены сравнительные расчеты рабочего процесса с учетом и без учета такта наполнения.

Установлено, что «твердотельное» представление вихревого движения впускного воздуха, в случае отсутствия модели впускной системы, приводит к сильному упрощению реальной газодинамической картины внутрицилиндровых течений и оказывает существенное влияние на результаты расчетов образования оксидов азота и сажи в камере сгорания исследуемого двигателя.

Главным образом различие в полях локальных параметров рабочего тела сказалось на режиме частичной нагрузки ($p_e = 4.5$ бар, $n = 2000$ мин⁻¹). Уменьшение результирующего выхода сажи составило 42%, а результирующего выхода оксидов азота - 10% по сравнению со случаем при отсутствии модели впускной системы. Таким образом, подтверждается целесообразность усложнения расчетной модели за счет учета течений во впускной системе.

Третья глава посвящена верификации математической модели с использованием экспериментальных данных.

Для проверки модели сгорания и образования оксидов азота в цилиндре быстроходного дизеля ЗМЗ 5145.10 используются результаты экспериментальных исследований, выполненных в стендовых условиях на заводе-изготовителе в рамках хозяйственной работы между ОАО «ЗМЗ» и кафедрой «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В ходе проведенных исследований были получены экспериментальные индикаторные диаграммы и эмиссии оксидов азота для режимов максимального крутящего момента и номинальной мощности. Индицирование двигателя проводилось на экспериментальной установке «Indimaster» фирмы AVL с пьезокварцевыми датчиками давления GM12G этой же фирмы. Для измерения концентрации оксидов азота использовался газоанализатор EXSA-1500 фирмы «HORIBA».

Ранее было отмечено, что для эмпирического коэффициента A модели сгорания Магнуссена-Хартагера требуется корректировка на основе согласования расчетных и экспериментальных данных. Лучшие согласование расчетной и экспериментальной индикаторных диаграмм на указанных режимах работы наблюдается при значении $A=10$. Максимальное расхождение между расчетом и экспериментом по среднему давлению в цилиндре на режиме максимального крутящего момента составило 4.35%, а на режиме номинальной мощности - 4.2%. Минимальное расхождение с экспериментом по выбросам оксидов азота для обоих режимов работы также достигается при $A=10$, что составляет 4.22% на режиме максимального крутящего момента и 5.2% на режиме номинальной мощности соответственно. Значение $A=10$ ис-

пользуется для дальнейших исследований по улучшению экологических показателей базового двигателя.

Для верификации модели сажеобразования используются экспериментальные данные, полученные для дизеля на базе Caterpillar 3400 ($D/S=137.6$

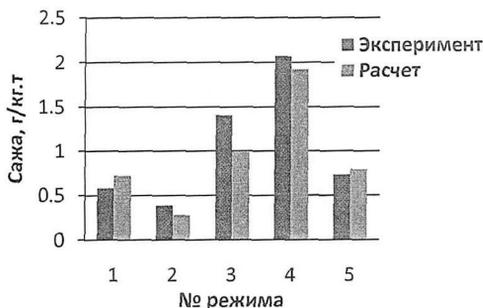


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных значений эмиссии сажи

риментом по абсолютным значениям эмиссии сажи составило 15% (рис. 2). Учитывая сложность процесса сажеобразования, а также отсутствие в данном случае модели впускной системы, такую погрешность можно считать приемлемой и использовать модель сажеобразования С.М. Фролова для дальнейших исследований данной работы.

В четвертой главе исследуются возможность одновременного снижения содержания NO_x и сажи в выпускных газах базового дизеля путем настройки конструктивных и регулировочных параметров, а также за счет организации альтернативного процесса сгорания.

Целевой режим для этих исследований – режим частичной нагрузки ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹), являющийся одним из типичных для европейского ездового цикла. Соответствие стационарных эмиссий NO_x и сажи (в г/кг топлива) на этом режиме нормам Евро для легковых автомобилей показано в таблице 2.

мм / 165.1 мм) в лаборатории ДВС университета Wisconsin-Madison, США (руководитель лаборатории - проф. Reitz R.). Для проведения сравнительных расчетов рассматриваются пять режимов работы, характеризующихся диапазоном нагрузок от 25 до 100% и частот вращения двигателя от 953 до 1690 мин⁻¹.

В среднем, расхождение между расчетом и экспериментом

Таблица 2.

Соответствие концентрации оксидов азота и сажи в ОГ нормам Евро ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹)

	NO_x , г/кг.т	Сажа, г/кг.т
Евро-2	18	2
Евро-3	10	1
Евро-4	5	0.5
Евро-5	3.6	0.1
Евро-6	1.6	0.1

Результаты моделирование образования оксидов азота и сажи в цилиндре дизеля ЗМЗ 5145 с концептуальной моделью впускных каналов показало, что его эмиссия соответствует экологической норме Евро-3 по оксидам азота и норме Евро-2 по саже, что составляет 7.5 г/кг.т для NO_x и 1.5 г/кг.т для твердых частиц соответственно.

С целью снижения выхода сажи рекомендуется увеличить количество сопловых отверстий форсунки до $z=8$ при одновременном снижении их диаметра до значения 0.14 мм и повышении максимального давления впрыскивания до уровня 1800 бар. Очевидно, что для создания такого давления впрыскивания, необходима установка топливной системы аккумуляторного типа (Common Rail).

Интенсификация процесса сгорания при новых параметрах системы впрыскивания способствует лучшему выгоранию сажи и снижению ее содержания в выпускных газах примерно в 2.7 раза, что составляет 0.58 г/кг.т и удовлетворяет экологическому стандарту Евро-3. Негативным последствием интенсификации процессов смесеобразования и сгорание является почти трехкратное увеличение эмиссии оксидов азота из-за роста максимальных температур цикла. Для компенсации этого повышения доля рециркулируемых ОГ увеличивается с 10% до 20%. Это приводит к снижению максимальных температур сгорания и снижению эмиссии оксидов азота до 7.45 г/кг.т, т.е. к возвращению практически на прежний уровень. Однако, из-за ухудшения условий выгорания, выход сажи при $\text{EGR}=20\%$ увеличивается до 1.19 г/кг.т (на 51.3%).

С целью дальнейшего снижения эмиссии оксидов азота рекомендуется уменьшение степени сжатия до значения 16:1 вместо 19.5:1 для базового дизеля. За счет снижения максимальных температур сгорания удастся снизить эмиссию оксидов азота примерно на 25%.

Уменьшение степени сжатия приводит к снижению давления и температуры воздуха в цилиндре к началу подачи топлива. Это способствует су-

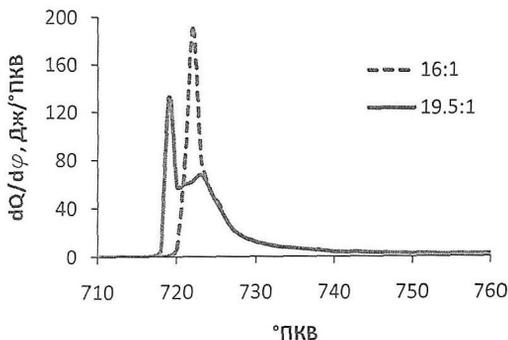


Рис. 3. Скорости тепловыделения при различных значениях степени сжатия ($p_c=4.5$ бар, $n=2000$ об/мин)

щественному увеличению периода задержки воспламенения и дальнейшему сгоранию топливоздушнoй смеси с преобладанием кинетического механизма горения (рис.3).

Благодаря более равномерному распределению топлива по объему КС, а также сокращению диффузионной стадии сгорания (из-за увеличения периода за-

держки воспламенения), при использовании камеры сгорания с более низкой степенью сжатия удается также уменьшить выход сажи - примерно на 40%. Таким образом, при снижении степени сжатия удалось достигнуть одновременного снижения эмиссии оксидов азота и сажи.

На рис. 4 показаны поля локальных концентраций сажи в цилиндре исследуемого дизеля для рассматриваемых значений степени сжатия и при положении поршня 10° ПКВ после ВМТ.

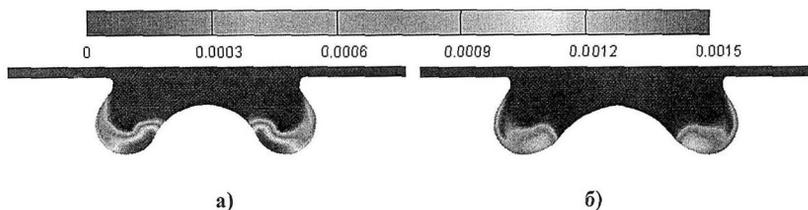


Рис. 4. Поля массовых долей сажи при различных значениях степени сжатия: а - 19.5:1; б - 16:1 ($p_c=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹)

Несмотря на более низкое значение степени сжатия, благодаря интенсификации процессов смесеобразования и сгорания при новых параметрах системы впрыскивания, удалось не только сохранить, но и улучшить эффективные показатели (мощность, крутящий момент и удельный расход топлива) базового дизеля на 3% на режиме максимального крутящего момента и на 6% на режиме номинальной мощности соответственно.

Дальнейшего снижения выбросов сажи на режиме частичной нагрузки

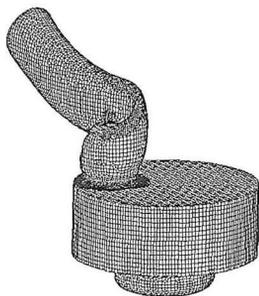


Рис. 5. Разбивка расчетной области на контрольные объемы при полностью закрытом тангенциальном канале

можно достигнуть за счет усиления закрутки впускного воздуха путем частичного или полного перекрытия тангенциального канала. Для проведения численных экспериментов рассматриваются два предельных случая - при полностью открытом и полностью закрытом тангенциальном канале. В первом случае расчетная область (система «впускные каналы - цилиндр») включает как спиральный, так и тангенциальный канал (рис. 1). Во втором случае расчетная область представляется только спиральным впускным каналом и цилиндром дизеля (рис.5).

В результате отключения тангенциального канала удается увеличить закрутку впускного воздуха почти в два раза, что составляет $D_n \sim 2$ на момент закрытия впускных клапанов. На рис 6 приведены результаты расчета образований оксидов азота и сажи при $D_n = var$, различных долях EGR и с учетом границ для норм Евро. При этом рассмат-

ривается четыре значения степени рециркуляции: 15%; 20%; 22.5% и 25%. Оптимальное значение степени рециркуляции выбирается из условия лучшего компромисса между выбросами оксидов азота и сажи. С точки зрения выполнения нормы Евро-4 для $D_n=2$ это значение составляет 22.5%.

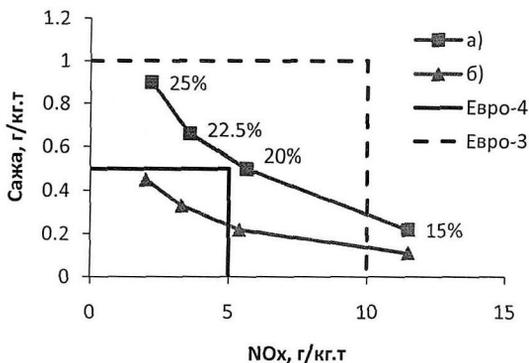


Рис. 6. Выбросы оксидов азота и сажи при различных значениях долей EGR и закрутки впускного воздуха: а - $D_n=1$; б - $D_n=2$ ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹)

При таком значении доли EGR концентрация оксидов азота в ОГ составляет 3.31 г/кг.т, а сажи - 0.33 г/кг.т, что на 51% ниже, чем при $D_n=1$. Уменьшение содержания в выпускных газах сажи при $D_n=2$ достигается за счет интенсификации процесса ее окисления (рис. 7).

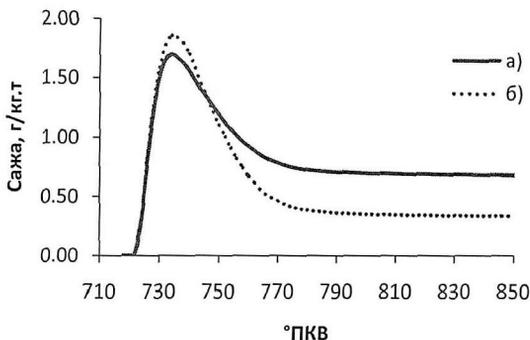


Рис. 7. Динамика сажеобразования:
а - $D_n=1$; б - $D_n=2$ ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ об/мин)

нения, приводящих, в частности, к высоким скоростям нарастания давления. Максимальная скорость нарастания давления при $D_n=2$ и EGR=22.5 % составила 10.4 бар/°ПКВ. Известно, что величина этой скорости определяет дру-

Несмотря на достигнутые результаты по одновременному снижению концентрации оксидов азота и сажи в ОГ исследуемого дизеля и доведения их уровня до соответствия экологическому стандарту Евро-4, рабочий процесс на рассматриваемом режиме работы протекает с большими скоростями тепловыделе-

гой, наряду с эмиссией оксидов азота и сажи, важный экологический параметр поршневого двигателя – уровень шума от рабочего процесса. В последнем случае уровень шума составил 88.9 дБ (на расстоянии 1 м от двигателя).

Для снижения уровня шума рекомендуется характеристика впрыскивания с тремя порциями топлива за цикл: предварительной (пилотной), основной и дополнительной (рис.8).

Интервал между основным и предварительным впрыскиваниями составляет 1°ПКВ, а интервал между основным и дополнительным впрыскиваниями – 8°ПКВ. Рассматриваются равные массовые доли пилотной и дополнительной порций, составляющие 3.5% от основного впрыскивания.

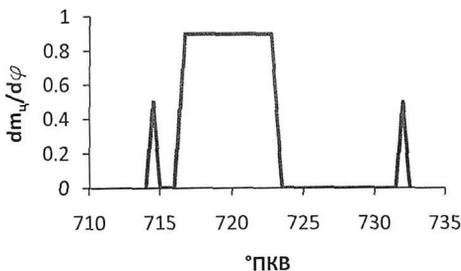


Рис. 8. Характеристика многократного впрыскивания топлива ($p_c=4.5$ бар, $n=2000$ об/мин)

Сгорание предварительной порции способствует повышению температуры в цилиндре перед подачей основной порции, сокращению периода задержки ее воспламенения и снижению максимальной скорости тепловыделения до 115 Дж/°ПКВ (вместо 195 Дж/°ПКВ при однократном впрыскивании). В результате изменения скорости тепловыделения максимальная скорость нарастания давления снижается до 7.2 бар/°ПКВ, что приводит к снижению уровня шума ~ на 7% (до 82.6 дБ). При этом значения эмиссий оксидов азота и сажи, по отношению к варианту с однократным впрыскиванием топлива, практически не изменились и составили 3.27 г/кг.т для оксидов азота и 0.335 г/кг.т для сажи соответственно.

Цель подачи дополнительной, после основной, порции топлива заключается в компенсации повышения выхода сажи, возникающего из-за увеличения доли диффузионного сгорания. Численные исследования показали, что исключение из представленного на рис. 8 закона топливоподачи дополнительной, после основной, порции топлива приводит к увеличению выхода сажи примерно 40%.

Дальнейшее снижение эмиссии оксидов азота и сажи возможно за счет организации альтернативного процесса сгорания. В качестве альтернативного рассматривается частично-гомогенный процесс сгорания, относящийся к категории HPLI-процессов (Highly Premixed Late Injection).

Организация этого процесса осуществлялась за счет сокращения продолжительности впрыскивания (на 2°ПКВ) и значительного увеличения степени рециркуляции ОГ (50% вместо 22.5% для классического процесса) при неизменном моменте начала подачи топлива.

Указанные мероприятия приводят к значительному увеличению задержки воспламенения (за счет повышения доли EGR) и полному разделению процессов впрыскивания и воспламенения топлива примерно на 2.5° ПКВ. Дальнейшее сгорание смеси воздуха и паров топлива носит преимущественно кинетический характер, диффузионная фаза процесса практически отсутствует. Максимальная скорость тепловыделения составляет порядка 160 Дж/°ПКВ (рис.9).

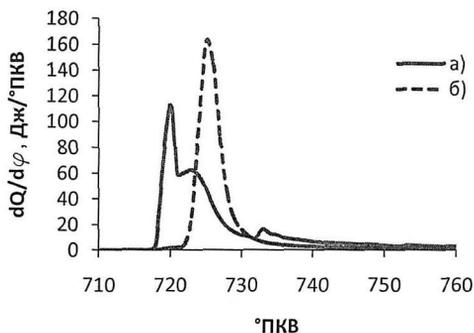


Рис. 9. Скорости тепловыделения: а - классический процесс; б - частично-гомогенное сгорание ($p_e=4.1$ бар, $n=2000$ мин⁻¹)

Несмотря на существенное увеличение скорости тепловыделения, максимальные локальные температуры, за счет высокой степени рециркуляции, не превышают 2100К. Снижение максимальных локальных температур, а также уменьшение содержания кислорода в заряде позволило практически полностью блокировать образование оксидов азота. Выход NO_x при альтернативном процессе сгорания составил 0.005 г/кг.т.

О степени гомогенизации топливовоздушной смеси можно судить по полученным температурным полям в цилиндре двигателя при сгорании (рис. 10). Очевидно более равномерное распределение локальных температур при альтернативном процессе сгорания.

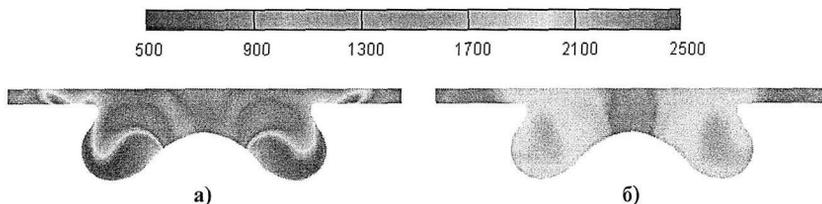


Рис. 10. Локальные поля температур: а - классический процесс; б - частично-гомогенное сгорание ($p_e=4.1$ бар, $n=2000$ мин⁻¹)

Выравнивание полей локальных параметров топливовоздушной смеси и минимизация диффузионной стадии сгорания позволяют снизить выход сажи до значения 0.15 г/кг.т, что на 55% меньше, чем при классическом дизельном процессе. Гарантированное доведение, по необходимости, уровня эмиссии сажи до соответствия стандарту Евро-5 можно достичь путем дополнительной очистки ОГ с помощью фильтра твердых частиц, но при значительно меньших затратах, чем при классическом дизельном процессе.

Основные выводы

1. Для проведения численных экспериментов по исследованию возможностей снижения концентраций оксидов азота и сажи в выпускных газах быстроходного дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива целесообразно использовать 3D-CFD модель рабочего процесса, базирующуюся на методе контрольных объемов. Численную реализацию модели рекомендуется производить в CFD-коде FIRE фирмы AVL List GmbH (Австрия).
2. Установлена необходимость учета трехмерных нестационарных течений во впускной системе в общей модели расчета турбулентного сгорания и образования вредных веществ. Для учета процесса наполнения создана концептуальная модель системы «впускные канал-цилиндр» с различными комбинациями спирального и тангенциального впускных каналов и цилиндра двигателя. Целесообразность усложнения расчетной модели за счет включения такта наполнения подтверждена результатами отдельных сравнительных расчетов с учетом и без учета такта наполнения.
3. Верификации моделей сгорания и образования оксидов азота, проведенные с применением экспериментальных индикаторных диаграмм и измеренных эмиссии оксидов азота для двигателя ЗМЗ 5145.10 на режимах максимального крутящего момента и номинальной мощности, подтверждают адекватность принятых моделей. На основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных была уточнена модель сгорания Магнуссена-Хартагера. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм составило 4.35% на режиме максимального крутящего момента ($N_e=53$ кВт, $n=2000$ мин⁻¹) и 4.2% на режиме номинальной мощности ($N_e=85$ кВт, $n=4000$ мин⁻¹) соответственно. Максимальное расхождение по рассчитанным и измеренным эмиссиям оксидов азота составило 4.2% на режиме максимального крутящего момента и 5.2% на режиме номинальной мощности соответственно.
4. Апробация применяемой в этой работе модели сажеобразования, предложенной С.М. Фроловым, с использованием экспериментальных данных для дизеля Caterpillar 3400, подтвердила адекватность получаемых с ее помощью результатов. Расхождение между расчетом и экспериментом по абсолютным значениям эмиссии сажи составило в среднем 15%. Учитывая сложность процесса сажеобразования, а также отсутствие в данном случае модели впускной системы, такую погрешность можно считать приемлемой и рекомендовать используемую модель сажеобразования для практического применения при моделировании внутрицилиндровых процессов в поршневых двигателях.

5. Исследование образования оксидов азота и сажи в цилиндре базового дизеля на целевом режиме работы ($p_e=4.5$ бар, $n=2000$ мин⁻¹), являющегося одним из типичных режимов для европейского ездового цикла (NEDC), показало, что эмиссии этих веществ составляют 7.5 г/кг.т для NO_x и 1.5 г/кг.т для сажи, что удовлетворяет экологической норме Евро-3 по оксидам азота и норме Евро-2 по твердым частицам соответственно.

6. С целью снижения выхода сажи предлагается увеличить количество сопловых отверстий форсунки до $z=8$ при одновременном снижении их диаметра до значения 0.14 мм и повышении максимального давления впрыскивания до уровня 1800 бар. Интенсификация процесса сгорания при новых параметрах системы впрыскивания способствует лучшему выгоранию сажи и снижению ее содержания в выпускных газах до значения 0.58 г/кг.т, что удовлетворяет экологическому стандарту Евро-3. Для компенсации повышения эмиссии оксидов азота при новых параметрах системы впрыскивания степень рециркуляции ОГ увеличена с 10% до 20%. Это приводит к снижению максимальных температур сгорания и возвращению эмиссии оксидов азота практически на прежний уровень.

7. Для дальнейшей минимизации эмиссии NO_x рекомендуется снижение степени сжатия двигателя с 19.5:1 (для базового двигателя) до значения 16:1. За счет снижения максимальных температур сгорания это позволяет снизить [NO_x] примерно на 25%. При этом, благодаря более равномерному распределению топлива по объему КС и сокращению диффузионной стадии сгорания из-за роста задержки воспламенения, удается также уменьшить эмиссию сажи на 40%.

8. Повышение интенсивности закрутки впускного воздуха, за счет отключения тангенциального канала, способствует снижению выхода сажи почти в два раза, при практически неизменном уровне эмиссии оксидов азота. При значении доли EGR 22.5% и интенсивности закрутки $D_n=2$ эмиссия оксидов азота составляет 3.31 г/кг.т, а сажи - 0.33 г/кг.т, что удовлетворяет требованиям экологического стандарта Евро-4.

9. Для снижения уровня шума рекомендуется применение трехкратного впрыскивания топлива за цикл, характеризующегося предварительной (пилотной), основной и дополнительной порциями. Реализация такой характеристики впрыскивания позволила снизить уровень шума (на 5дБ) без увеличения выхода сажи и оксидов азота, и без ухудшения эффективных показателей дизеля.

10. Установлена возможность одновременного снижения содержания оксидов азота и сажи в выпускных газах быстроходного дизеля за счет органи-

зации частично-гомогенного процесса сгорания. Переход от классического дизельного процесса на частично-гомогенное сгорание позволил практически полностью (до 0.005 г/кг.т) блокировать образование оксидов азота. Выравнивание полей локальных параметров топливовоздушной смеси и минимизация диффузионной стадии сгорания позволили значительно снизить выход сажи (до 0.15 г/кг.т). Гарантированное доведение, по необходимости, уровня эмиссии сажи до соответствия стандарту Евро-5 можно достичь путем дополнительной очистки ОГ с помощью фильтра твердых частиц, но при значительно меньших затратах, чем при классическом дизельном процессе.

Список принятых обозначений и сокращений

C	- концентрация	кг/м ³
D	- диаметр цилиндра	мм
D_n	- вихревое число	-
H	- энтальпия	Дж
M_k	- крутящий момент двигателя	Н·м
N_e	- эффективная мощность	кВт
p	- давление	Па
p_e	- среднее эффективное давление	бар
S	- ход поршня	мм
T	- температура	К
φ	- угол поворота коленчатого вала	°ПКВ
τ	- время	с

ВМТ - верхняя мёртвая точка; НМТ – нижняя мёртвая точка; КС – камера сгорания; ОГ – отработавшие газы; г/кг.т – г/ кг топлива; EGR – Exhaust Gas Recirculation; ° ПКВ – градус поворота коленчатого вала.

Основные положения диссертации опубликованы в 12 работах:

1. Сергеев С.С. Экологические показатели дизельного процесса с частично-гомогенным сгоранием // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях: Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Звенигород, 2011. 424 с.
2. Сергеев С.С. Моделирование дизельного процесса с частично-гомогенным сгоранием // Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: Тезисы докладов научно-технической конференции 5-е Луканинские чтения. М., 2011. 221 с.

3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Сергеев С.С. Влияние впускной системы на образование вредных компонентов в камере сгорания дизеля // Тепловые процессы в технике. 2011. №5. С 210.
4. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Сергеев С.С. Сравнительный анализ трехмерных расчетов рабочего процесса дизеля с моделированием и без моделирования такта наполнения // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. М., 2010. Т.3. С. 230-233.
5. Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Влияние конструкции впускного канала на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания быстрого дизеля // Энергетические установки: тепломассообмен и процессы горения: Материалы I Международной научно-технической конференции. Рыбинск, 2009. С.31-35.
6. Сергеев С.С. Моделирование локальных образований оксидов азота и сажи в камере сгорания быстрого дизеля // Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях: Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Жуковский, 2009. Т.1. С. 414-416.
7. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., 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. P.4308-4316.
8. Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Влияние формы камеры на нестационарные процессы переноса и турбулентного сгорания в дизеле, конвертированном в газовый двигатель // Известия РАН. Энергетика. 2009. №2. С.49-63.
9. Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С. Исследование локальных образований оксидов азота и сажи на основе трехмерной нестационарной модели сгорания // Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: Тезисы докладов научно-технической конференции 4-е Луканинские чтения. М., 2009. С. 28-30.
10. Зеленцов А.А., Сергеев С.С. Моделирование трехмерного турбулентного движения газов во впускной системе поршневого двигателя // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. СПб., 2007. С. 145-147.
11. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Сергеев С.С. Моделирование сгорания и образования вредных веществ в цилиндре быстрого дизеля // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. СПб., 2007. С. 152-155.
12. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Сергеев С.С. Численное исследование трехмерного турбулентного течения газа в системе «ресивер-цилиндр» // Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: Тезисы докладов научно-технической конференции 3-и Луканинские чтения. М., 2007. С. 61-63.

Подписано к печати 26.09.11. Заказ № 659
Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
(499) 263-62-01