

УДК 621.436

Севиздрал С.П.<sup>1</sup>, Кухаренок Г.М.<sup>2</sup>, Березун В.И.<sup>1</sup>

1 - ОАО Минский моторный завод;

2 - Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УРОВНЯ ЕВРО-4 И ЕВРО-5 НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЯХ МИНСКОГО МОТОРНОГО ЗАВОДА**

*Изложены результаты исследований по достижению экологических требований уровня ЕВРО-4 и ЕВРО-5 на автомобильных дизелях Минского моторного завода. Основное внимание уделено доводке рабочего процесса двигателя. Произведена оценка влияния на экологические показатели систем рециркуляции и очистки отработавших газов.*

### ***Постановка проблемы***

Минский моторный завод выпускает 3-х, 4-х, 6-и, 8-и цилиндровые дизельные двигатели в диапазоне мощностей от 22 до 450 кВт. В ближайшее время планируется расширение линейки мощностей. Двигатели Минского моторного завода устанавливаются на комбайны, трактора, автомобили, спец. технику, а также на генераторные установки. Широкий диапазон мощностей и модификаций усложняют процесс конструирования и накладывают свой отпечаток на ряд конструктивных решений, обеспечивающих снижение выбросов вредных веществ в отработавших газах и расхода топлива.

### ***Анализ последних исследований и публикаций***

Ужесточающиеся экологические нормы заставляют производителей двигателей внутреннего сгорания проводить исследования в области совершенствования рабочего процесса и искать дополнительные источники снижения выбросов вредных веществ.

Ведущими организациями в области исследования рабочего процесса установлено, что экологические показатели двигателей уровня ЕВРО-4 и выше могут быть достигнуты только с помощью электронного управления топливоподачей в сочетании с высоким давлением впрыска, применением системы рециркуляции и систем очистки отработавших газов.

Перспективным направлением снижения выбросов вредных веществ является применение многофазного впрыска и управление характеристикой впрыска топлива, которые в сочетании с электронной системой управления позволяют достигать жестких экологических требований [1, 2].

### ***Цель работы***

Данная работа имеет цель – определить основные параметры двигателя внутреннего сгорания, влияющие на экологические показатели, и разработать технические решения по обеспечению экологических требований.

### ***Материалы и результаты исследования***

Основным мероприятием достижения экологических показателей дизелей на Минском моторном заводе является снижение «сырого» выброса вредных веществ двигателем без рециркуляции отработавших газов, которое осуществляется главным образом за счет совершенствования рабочего процесса. Выбросы вредных веществ удалось снизить, применив ряд мероприятий по доводке топливной аппаратуры:

- подбор углов распыляющих отверстий распылителя;
- подбор количества распыляющих отверстий распылителя;
- подбор пролива распылителя ( $\mu_f$ );
- увеличение давления впрыска ( $P_{впр}$ );
- аппликация параметров топливной системы;
- разработка формы камеры сгорания;
- подбор вихревого отношения впускных каналов ( $\omega_v$ ).

На двигателях уровня ЕВРО-4 применяется система топливоподачи CommonRail с ТНВДСР 3.3 и электрогидравлическими форсунками CRIN2, максимальное давление впрыска топлива 160 МПа (рисунок 1).

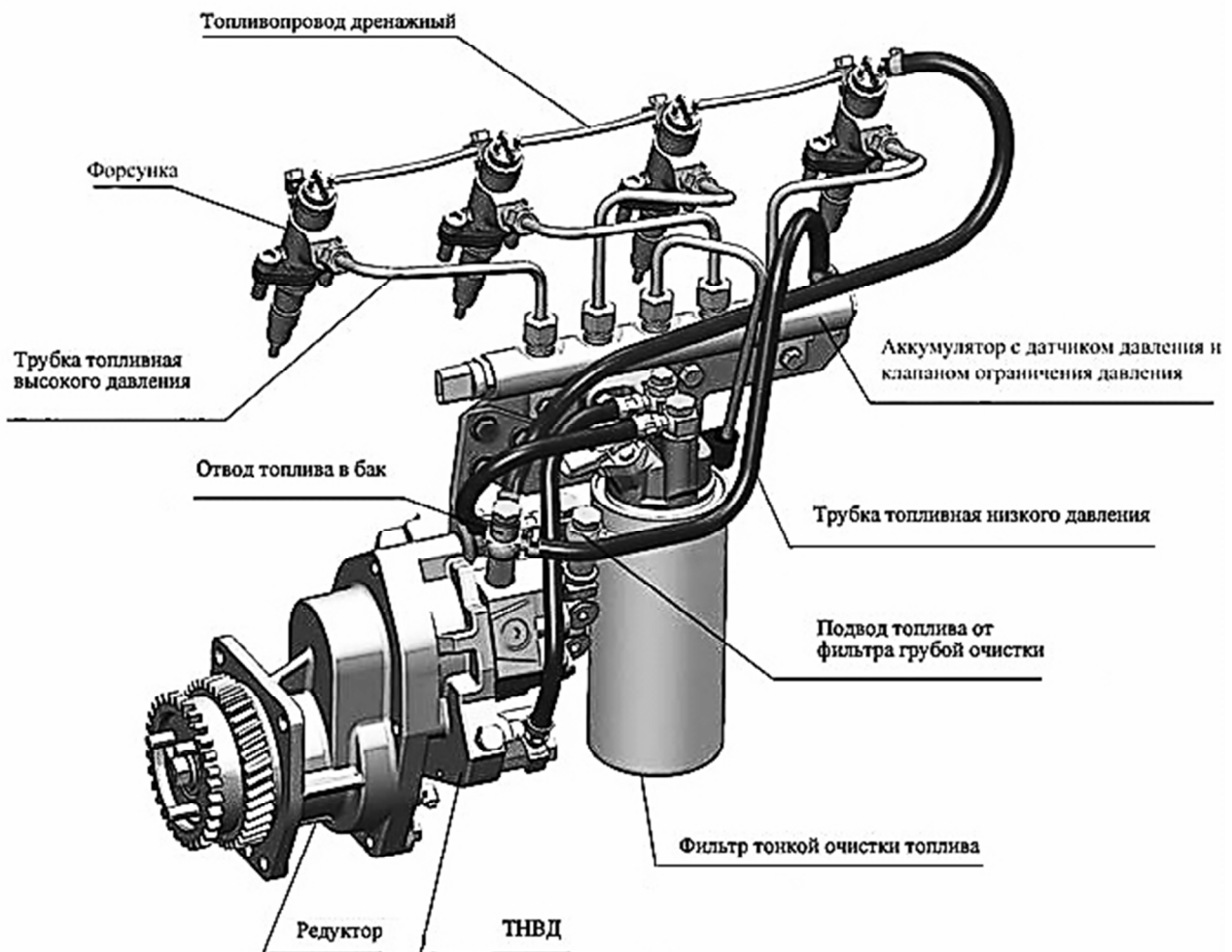


Рисунок 1 – Система топливоподачи семейства двигателей Д-245Е4

Наклонная форсунка усложняет процесс выбора распылителя и увеличивает количество возможных вариантов исследования топливных струй. После предварительного моделирования были изготовлены 5 видов распылителей, отличающихся углами и количеством распыляющих отверстий, проливом и углами раскрытия шатра топливных факелов.

Модель камеры сгорания, построенная в программе объемного моделирования на стадии выбора распылителя (слева), и фотография камеры сгорания после испытаний (справа) показаны на рисунке 2.

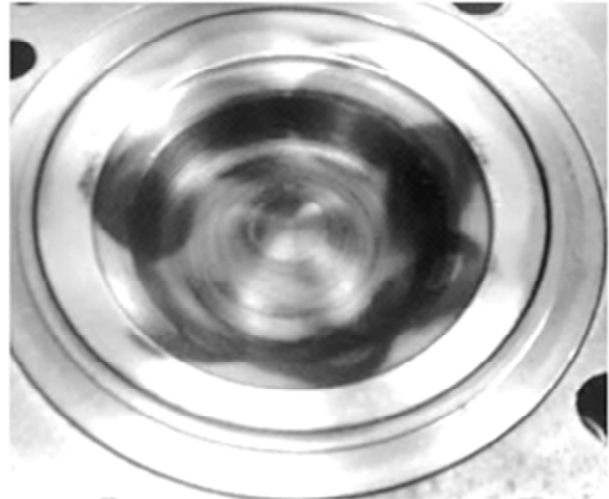
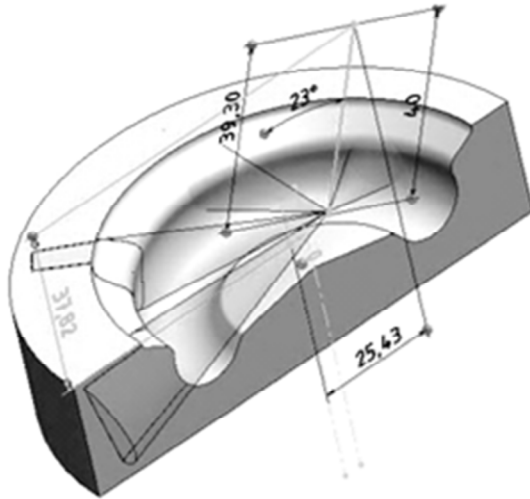


Рисунок 2 – Камера сгорания

Анализируя эффективные показатели двигателя, выбросы вредных веществ и следы топливных факелов на днище камеры сгорания, производился выбор распылителя. Проведя предварительные испытания в зоне цикла ESC (рисунок 3), были отобраны два распылителя (7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148° и 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°) и принято решение об изготовлении еще одного опытного образца 7-и струйного распылителя со сниженным проливом.

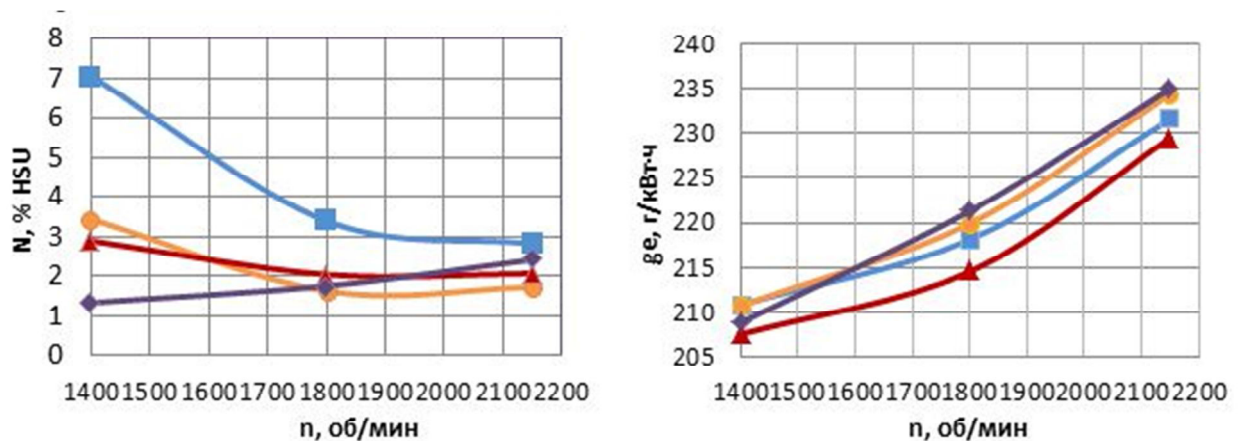


Рисунок 3 – Подбор количества распыляющих отверстий и пролива распылителей

- 6-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 145°;
- 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 145°;
- ▲— 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°;
- ◆— 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°

Выбранные распылители были испытаны на каждой точке цикла ESC с замером экологических показателей двигателя при различных значениях угла опережения впрыска ( $\Theta = 1, 3, 5$  град. пкв.) и давления впрыска топлива на каждой точке цикла ESC. Результаты испытаний на точке В-100 цикла ESC [2] приведены на рисунке 4.

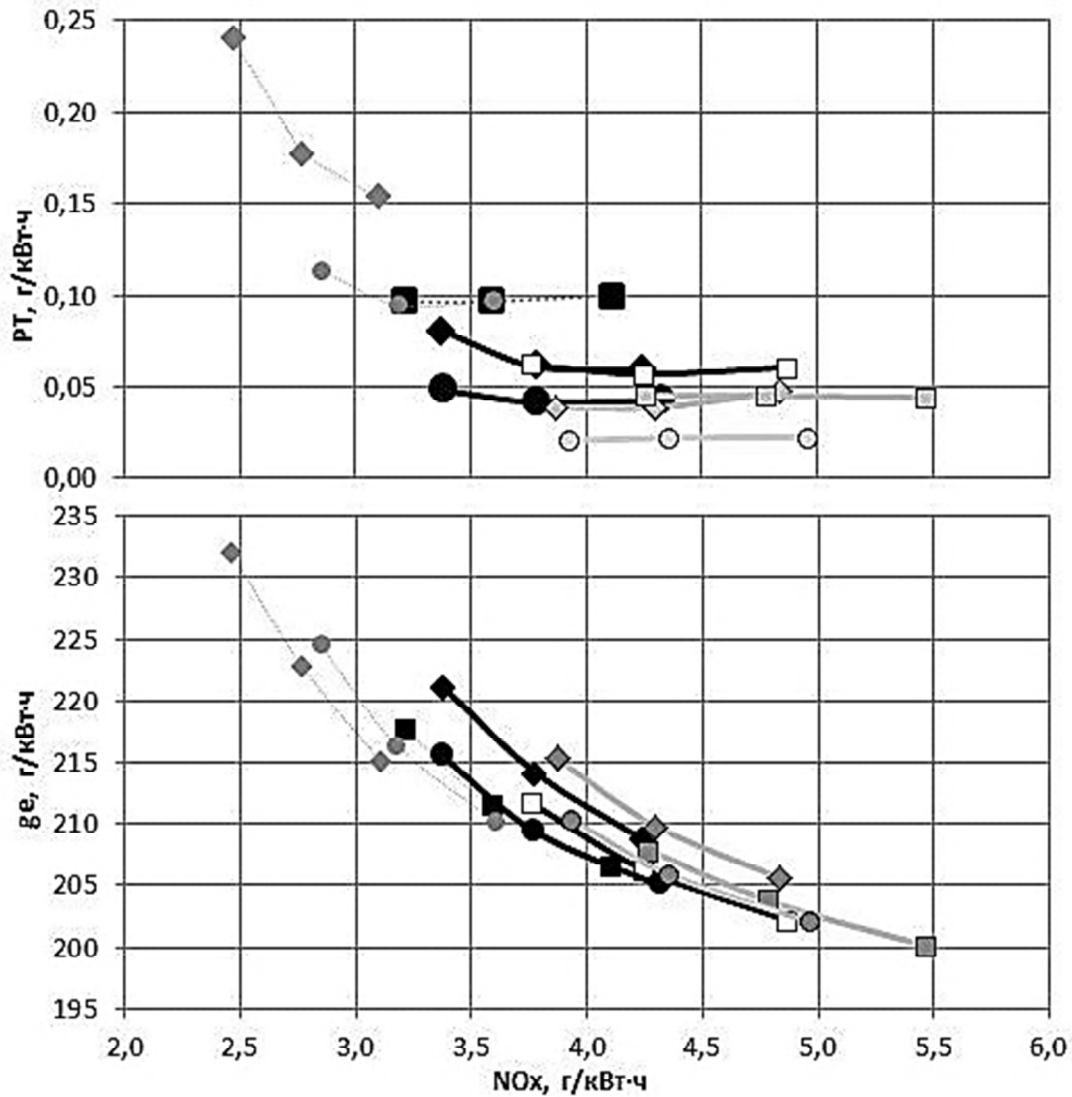


Рисунок 4 – Экологические и экономические показатели двигателя на точке В-100цикла ESC

- ◆ – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра  $149^\circ$ ,  $P_{впр} = 120$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 120$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 500, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 120$  МПа;
- ◆ – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра  $149^\circ$ ,  $P_{впр} = 140$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 140$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 500, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 140$  МПа;
- ◇ – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра  $149^\circ$ ,  $P_{впр} = 160$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 160$  МПа;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 500, угол раскрытия шатра  $148^\circ$ ,  $P_{впр} = 160$  МПа

Анализ всего массива данных позволил был выбрать 7-и струйный распылитель с проливом 500 и углом раскрытия шатра  $148^\circ$ .

Для обеспечения требуемых экологических норм и минимального расхода топлива были сформированы таблицы аппликационных параметров электронного блока управления двигателя. На рисунке 5 представлены поля давления впрыска топлива и угла опережения впрыска топлива в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя ( $n$ ) и цикловой подачи ( $G_{ц}$ ).



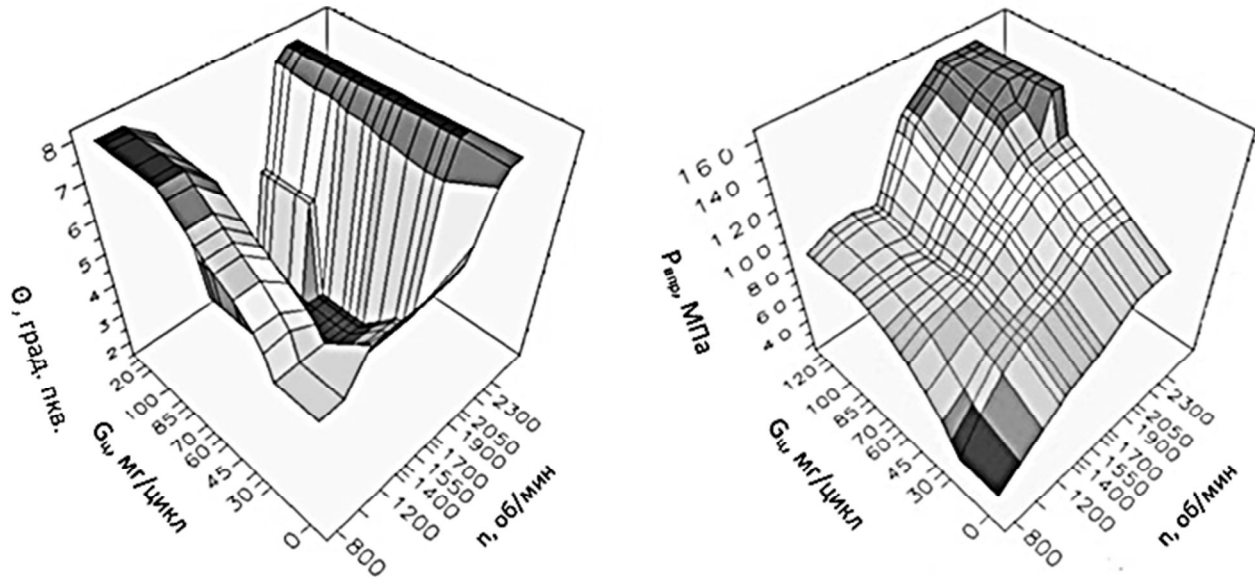


Рисунок 5 – Аппликация параметров топливной системы  
(давление впрыска, угол опережения впрыска)

Было исследовано влияние многофазного впрыска (пред- и поствпрыска) топлива на показатели двигателя. Получено, что предвпрыск снижает шумность и расход топлива, однако увеличивает выброс окислов азота ( $\text{NO}_x$ ), что исключило возможность его использование внутри цикла ESC. Отмечено влияние поствпрыска на выброс твердых частиц (PT).

На рисунке 6 представлена зависимость выбросов твердых частиц от цикловой подачи поствпрыска ( $g_{\text{пост}}$ ) и расстояния между концом основного впрыска и началом поствпрыска ( $\tau_{\text{пост}}$ ) на режиме B-100 цикла ESC. Тенденция снижения выбросов твердых частиц сохраняется на всех точках цикла ESC. Со снижением степени рециркуляции эффективность использования поствпрыска падает.

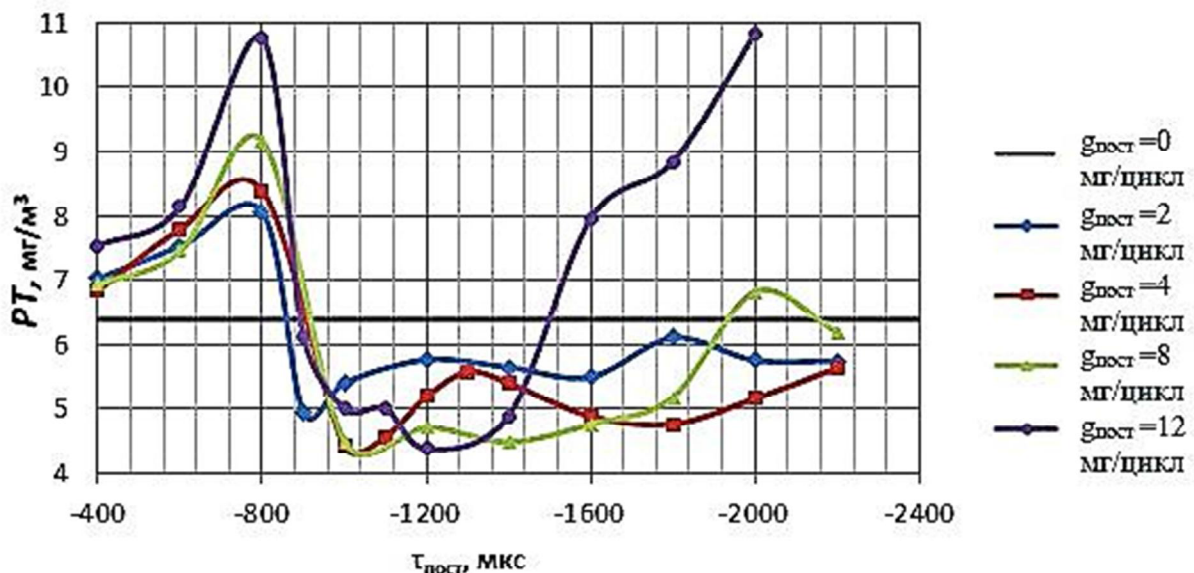


Рисунок 6 – Зависимость выбросов твердых частиц от цикловой подачи поствпрыска и расстояния между концом основного впрыска и началом поствпрыска на режиме B-100 цикла ESC

Выбор вихревого отношения является одним из важнейших мероприятий по совершенствованию рабочего процесса двигателя. На процесс смесеобразования также влияет конфигурация серповидной фаски на нижней плоскости головки блока цилиндров (ГБЦ). Были проведены исследования влияния вихревого отношения на выбросы вредных веществ и расход топлива. Изменение вихревого отношения осуществлялось путем изменения формы стержней каналов ГБЦ. Объемная модель стержня впускного канала (слева) и модель ГБЦ с измененной формой впускных каналов (справа) приведены на рисунке 7.

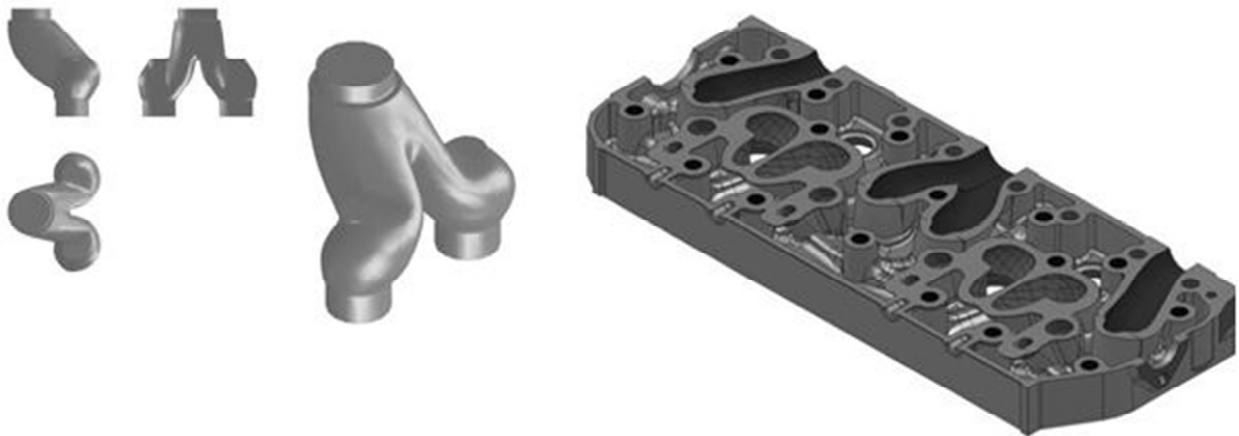


Рисунок 7 – Объемные модели стержня впускного канала и ГБЦ

Результаты исследований по подбору вихревого отношения впускных каналов приведены на рисунке 8. Эти исследования проводились на двух вариантах распылителей (7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра  $148^\circ$  и 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра  $149^\circ$ ) при различных полях характеристик угла опережения впрыска топлива, отличающихся эквидистантным смещением на 2 град. п.к.в. по всему полю вверх и вниз относительно базового поля (Б), приведенного на рисунке 5. Увеличение вихревого отношения с 2,88 до 3,75 привело к снижению выброса твердых частиц и расхода топлива при незначительном росте  $\text{NO}_x$ .

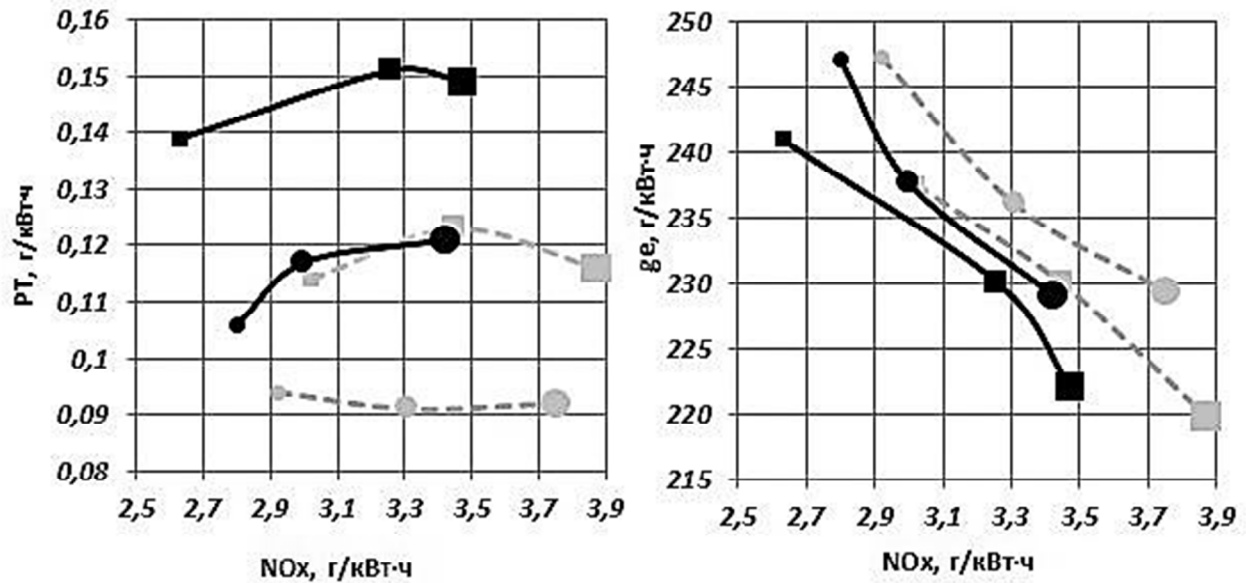


Рисунок 8 – Результаты испытаний ГБЦ с различным вихревым отношением впускных каналов

- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б - 2$  град. пкв.;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б - 2$  град. пкв.;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б - 2$  град. пкв.;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б - 2$  град. пкв.;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б$ ;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б$ ;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б$ ;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б$ ;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б + 2$  град. пкв.;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 3,75$ ,  $\Theta = Б + 2$  град. пкв.;
- – 7-и сопловой распылитель, пролив 600, угол раскрытия шатра 148°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б + 2$  град. пкв.;
- – 6-и сопловой распылитель, пролив 450, угол раскрытия шатра 149°,  $\omega_B = 2,88$ ,  $\Theta = Б + 2$  град. пкв.

Для обеспечения экологического уровня ЕВРО-4 были испытаны различные конфигурации камер сгорания. Опытные камеры приведены на рисунке 9. На этом рисунке справа внизу показана выбранная камера сгорания с отпечатками топливных факелов, в левой верхней части приведены эскизы разрабатываемых камер сгорания.

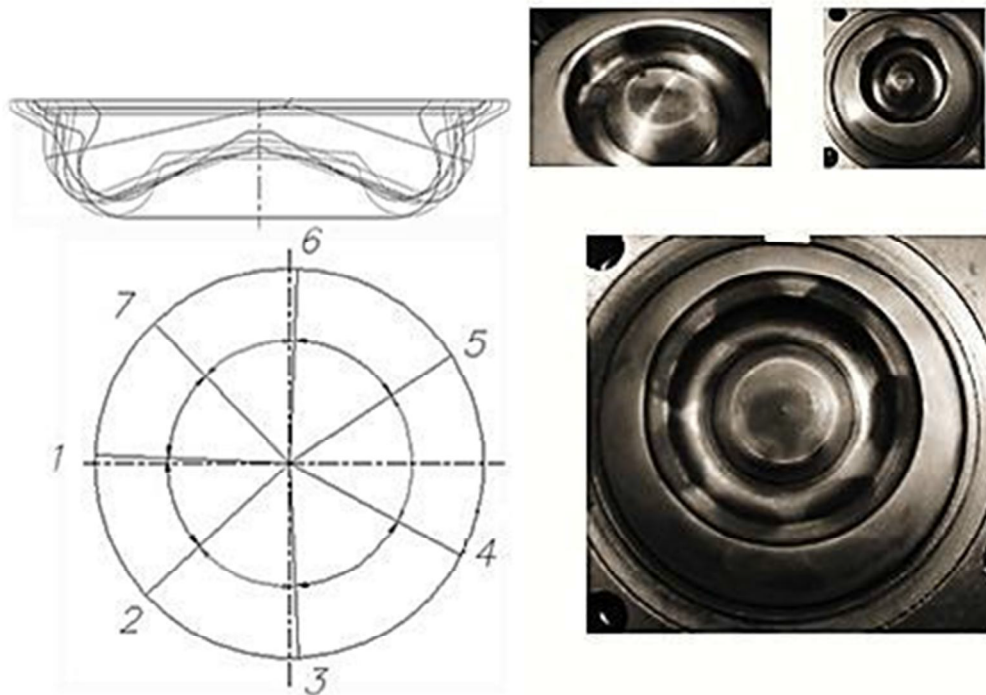


Рисунок 9 – Камеры сгорания

Для дальнейшего снижения выбросов вредных веществ в рамках достижения экологических показателей уровня ЕВРО-4 была принята стратегия снижения выбросов  $\text{NO}_x$  путем применения системы рециркуляции отработавших газов и твердых частиц за счет системы очистки отработавших газов (рисунок 10).

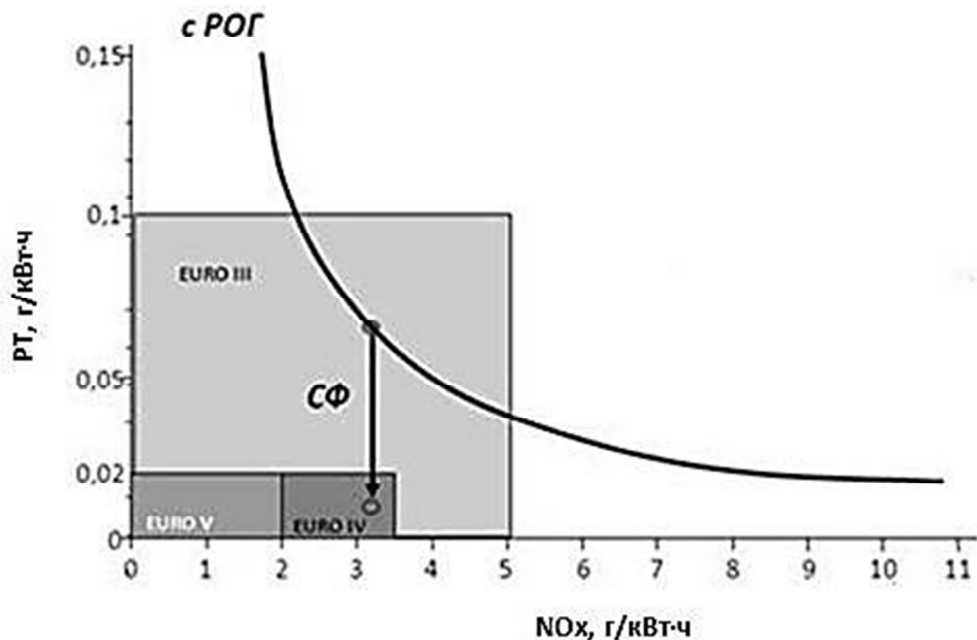


Рисунок 10 – Стратегия достижения норм ЕВРО-4:

РОГ – рециркуляция отработавших газов; СФ – сажевый фильтр

Применена система РОГ по контуру высокого давления (рисунок 11) совместно с системой очистки отработавших газов, состоящей из окислительного нейтрализатора и сажевого фильтра с пассивной регенерацией (рисунок 12).

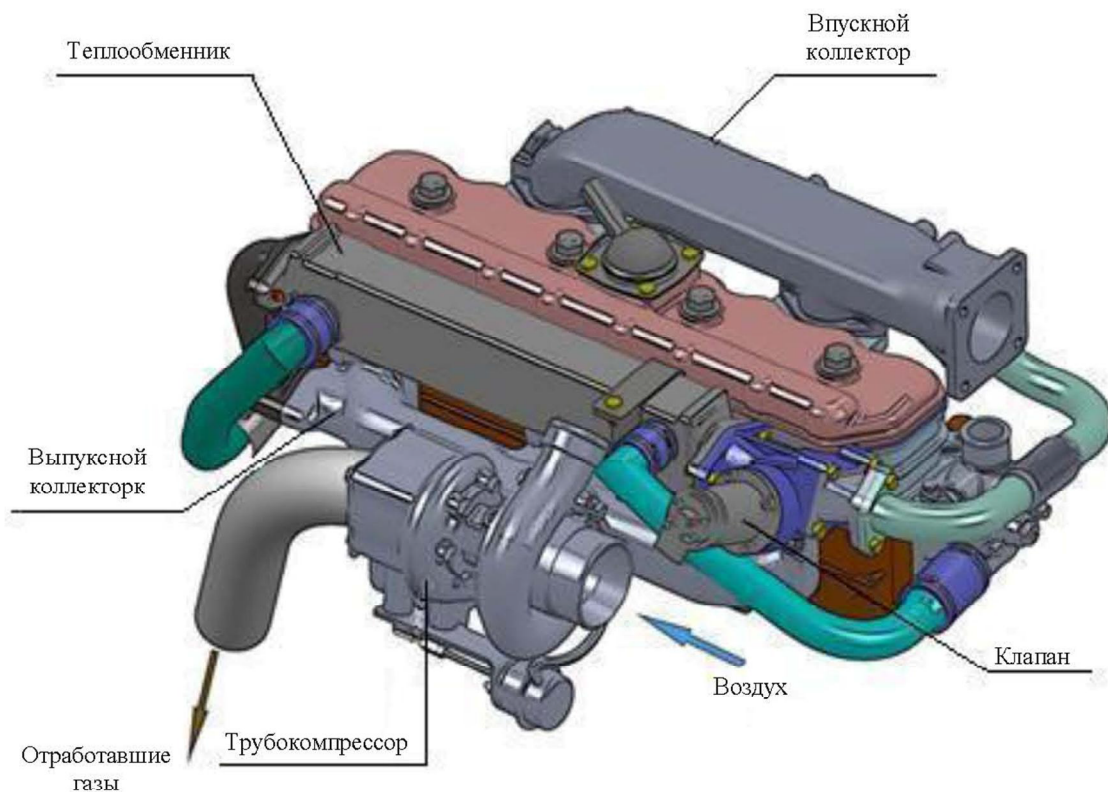


Рисунок 11 – Система РОГ по контуру высокого давления

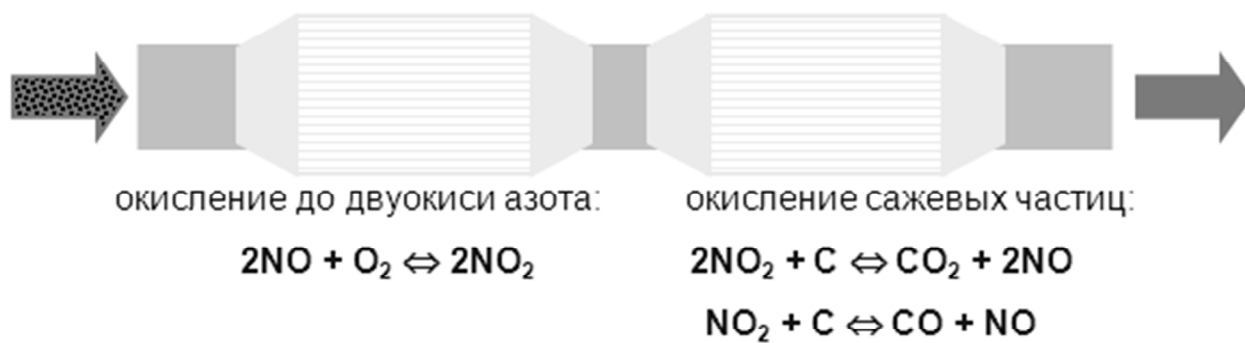


Рисунок 12 – Схема работы системы очистки отработавших газов

С выбранной комплектацией двигателя были проведены стендовые испытания (рисунок 13).



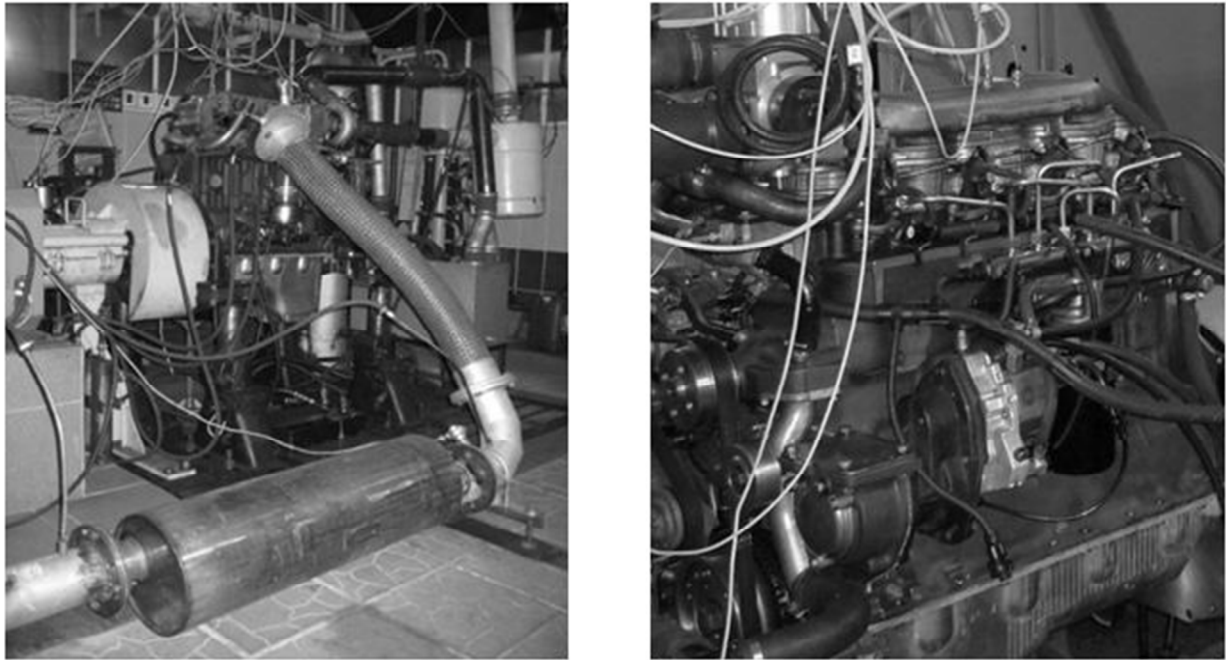


Рисунок 13 – Стендовые испытания двигателя

Результаты испытаний двигателя с выбранной комплектацией приведены на рисунке 14.

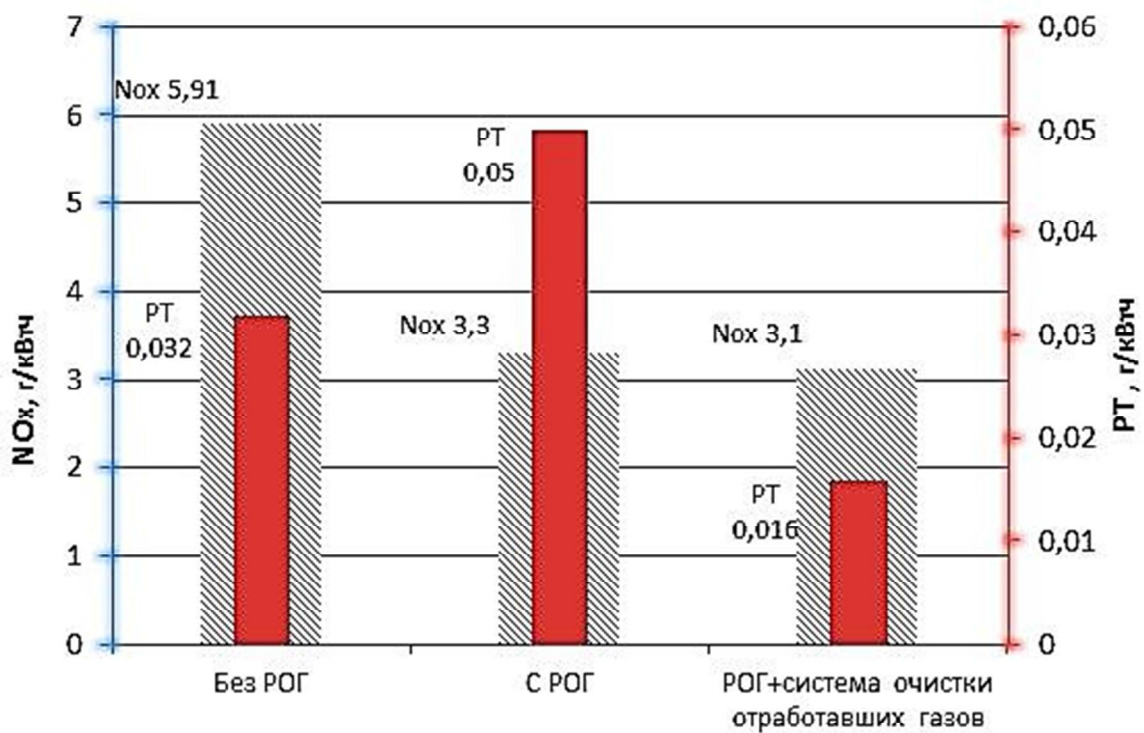


Рисунок 14 – Влияние РОГ и системы очистки отработавших газов на экологические показатели по циклу ESC

### **Выводы**

Применение системы РОГ позволило достичь требуемого уровня выбросов NO<sub>x</sub> при угле опережения впрыска, большем, чем без системы рециркуляции. Это в сочетании с увеличением давления впрыска позволило существенно снизить расход топлива.

Итогом проведенных конструкторских и исследовательских работ стал двигатель мощностью 130 кВт, отвечающий экологическому уровню ЕВРО-4 с минимальным расходом топлива 200 г/кВт·ч и выбросами вредных веществ по циклу ESC: NO<sub>x</sub> = 3,1 г/кВт·ч; СО = 0,038 г/кВт·ч; СН = 0,043 г/кВт·ч; РТ = 0,016 г/кВт·ч.

Для достижения экологических показателей уровня ЕВРО-5 на Минском моторном заводе была применена система впрыска мочевины SCR. Выбросы вредных веществ по циклу ESC составляют: NO<sub>x</sub> = 1,2 г/кВт·ч; СО = 0,041 г/кВт·ч; СН = 0,039 г/кВт·ч; РТ = 0,018 г/кВт·ч.

### **Литература**

1. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
2. Системы управления дизельными двигателями: пер. с нем. – М.: За рулем, 2004. – 480 с.

Рецензент: к.т.н., доц. А.В. Хімченко, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 20.06.12

© Севиздрал С.П., Кухаренок Г.М., Березун В.И., 2012