

# РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ФОРСИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## IMPLEMENTATION OF A BOOST STRATEGY FOR A DIESEL ENGINE NEUTRALIZATION SYSTEM BASED ON INTEGRATED DESIGN TECHNIQUES

Г.Г. НАДАРЕЙШВИЛИ, к.т.н.

ФГУП НАМИ, Москва, Россия, givi.nadareishvili@nami.ru

G.G. NADAREJSHVILI, PhD in Engineering

Central scientific research automobile and automotive engine institute «NAMI», Moscow, Russia, givi.nadareishvili@nami.ru

Работа посвящена стратегии форсирования системы нейтрализации при разработке или модернизации двигателей внутреннего сгорания при одновременном учете ужесточения экологических норм. Совершенствование двигателей внутреннего сгорания как в целом, так и их экологических систем – это возможность конкуренции с электрическим транспортом, развитие которого идет быстрыми темпами. Мировая хронология развития экологических норм показывает на главное отличие мирового экологического законодательства от российского – отставание в реализации норм на 2–4 года. Это дает возможность принятия решения на основе уже реализованного мирового опыта разработки систем нейтрализации.

В работе поставлена цель – обосновать основные направления выработки стратегических технических решений форсирования систем нейтрализации. Выбран двигатель-аналог с хорошо известными характеристиками – ЯМЗ-6566. Обоснована возможность форсирования базового двигателя на основе аналогичного мирового опыта, и приведен сравнительный технический и экономический анализ применяемых решений для системы нейтрализации с учетом возможности применения рециркуляции. Рассмотрены возможные направления совершенствования рабочих процессов: оптимизация камеры сгорания и степени сжатия, изменение стратегии впрыска, увеличение турбонаддува. По результатам отработки на двигателях КАМАЗ-740 получена экологическая базовая характеристика двигателя в координатах PM–NOx, позволяющая прогнозировать результат применения технических решений. По результатам выбранной стратегии форсирования базового двигателя ЯМЗ-6566 приведены результаты опытной отработки, проведенной на ФГУП НАМИ. Приведены варианты различных технических решений форсирования системы нейтрализации и их реализация на опытной установке. Показаны значения конверсии для различных вариантов технических решений для системы нейтрализации двигателя ЯМЗ-6566. Достигнутая степень конверсии NOx, равная 97 %, позволяет удовлетворить самые жесткие экологические нормы. Подтверждена возможность принятия стратегических решений по форсированию системы нейтрализации и последующая их техническая реализация при достижении поставленных значений экологических показателей двигателя.

*Ключевые слова:* дизельный двигатель, экологические нормы, форсирование ДВС, степень конверсии.

The work is devoted to the strategy of boosting the neutralization system during the development or modernization of internal combustion engines while taking into account toughening environmental standards. Improving internal combustion engines and their environmental systems is a possibility of competition with electric vehicles, which development is proceeding rapidly. The world chronology of the development of environmental standards shows the main difference between the global environmental legislation and the Russian one, which is the lag in the implementation of norms for 2–4 years. This makes it possible to make decisions based on already implemented world experience in the development of neutralization systems. The goal of the work is to substantiate the main directions of developing strategic technical solutions for boosting neutralization systems. An engine analog with well-known characteristics was selected – YaMZ 6566. The possibility of forcing the standard engine on the basis of similar world experience is substantiated and a comparative technical and economic analysis of the applied solutions for the neutralization system is given, taking into account the possibility of using recirculation. Possible directions for improving work processes are considered, among them there are: optimization of the combustion chamber and compression ratio, changing the injection strategy, increasing turbocharging. According to preliminary data on the results of testing on the KAMAZ 740 engine, the ecological basic characteristic of the engine in PM – NOx coordinates was obtained, this allows predicting the result using technical solutions. Based on the results of the chosen strategy of forcing the base engine YaMZ 6566, the results of experimental testing carried out at Central scientific research automobile and automotive engine institute «NAMI» are presented. Variants of various technical solutions for boosting the neutralization system and their implementation in a pilot device are presented. The conversion values for various technical solutions for the neutralization system for the YaMZ 6566 engine are shown. The achieved NOx conversion of 97 % allows to meet the most stringent environmental standards. The possibility of making strategic decisions on boosting the neutralization system and their subsequent technical implementation when achieving the set values of the environmental performance of the engine is confirmed.

*Keywords:* diesel engine, environmental standards, ICE boost, conversion rate.

## Введение

Несмотря на наступление электрических транспортных двигателей роль тепловых двигателей внутреннего сгорания остается значительной и останется такой в течении следующих десятилетий. Основное преимущество электрической трансмиссии лежит в области экологии. Однако совершенствование рабочих процессов тепловых двигателей и их систем способно существенно сократить преимущества электрической трансмиссии. Одна из основных систем, определяющих экологическое совершенство ДВС, – система нейтрализации, снижающая токсичность отработавших газов до экологических норм. Совершенствование систем нейтрализации является, таким образом, одной из актуальных задач снижения экологической нагрузки.

Суть законодательства, регулирующего нормы токсичности ДВС, заключается в нормировании набора токсичных веществ, содержащихся в отработавших газах. История регулирования насчитывает более 50 лет и более 6 степеней регулирования.

В конце XX века прошел процесс глобализации гармонизации требований к уровню безопасности, в том числе по экологическим характеристикам, на базе Женевского соглашения, сформулированные в форме Правил Европейской экономической комиссии (ЕЭК ООН).

В Северной Америке, Японии действуют свои правила, гармонизированные с Правилами ЕЭК ООН.

Правила ЕЭК ООН, действующие в Российской Федерации и Таможенном союзе, образуют гармоничную систему, описывающую требования по эмиссии токсичных веществ в отработавших газах транспортных средств,

Нормативная база экологических требований нацелена на обеспечение значительного снижения объема выбросов традиционных загрязнителей воздуха [1]. Стремления Правительства РФ ограничить экологические последствия, связанные с выбросами транспортных средств, приводят к стремительному техническому развитию основного источника загрязнений – двигателю внутреннего сгорания. Сокращение выбросов без совершенствования ДВС и связанных с введением все более жестких ограничений на предельные выбросы в основном для новых транспортных средств невозможно. Даже при существующей тенденции к переходу на электрическую тягу автотранспортные

средства (далее – АТС) продолжают использование ДВС в ближайшие 30–50 лет.

За прошедшее десятилетие технологии сокращения токсичных выбросов, используемые в конструкции транспортных средств, силовых установках, устройствах ограничения выбросов, при создании различных видов топлива, а также в конструкции трансмиссии были существенно улучшены. Транспортные средства, а это 100 % выпускаемых в мире и соответствующих современным предписаниям о выбросах, оснащены такими высокотехнологичными техническими устройствами ограничения выбросов, как каталитические преобразователи, дизельные сажевые фильтры и системы селективного каталитического восстановления, а также специально разработанными электронными системами управления работой двигателя. Существенное сокращение выбросов достигнуто при общем повышении мощности и экономичности ДВС.

В работах В.Ф. Кутенева [2], Г.С. Корнилова [4, 5, 6], В.А. Звонова [9, 10], В.Н. Луканина [3], В.А. Маркова [7], А.Р. Кульчицкого [8], М.Г. Шатрова [11] рассмотрены вопросы влияния автомобильного транспорта на атмосферный воздух.

В странах Таможенного союза нормы для атмосферного воздуха установлены ниже защитно-приспособительных реакций. В этом заключается отличие в подходе к нормированию по отношению к другим странам, в которых под критерием вредности загрязнения атмосферы понимается заболеваемость человека.

Другим отличием законодательства Таможенного союза является период в 2–3 года, на который отстает время введения норм в Таможенном союзе от введения аналогичных норм в Европе. Это дает возможность тщательно прорабатывать технические решения, предлагаемые к внедрению.

Работ по системам нейтрализации огромное количество, как посвященных разработке теоретических основ работы систем нейтрализации [12, 13, 14], так и практическим решениям [15–19].

## Цель исследования

При принятии решения форсирования двигателя или разработке нового с учетом технических задатов необходимо принимать решение по разработке и составу системы нейтрализации, учитывающее целый ряд фак-

торов, и оперативно оценивать возможности технических решений в приложении к конкретному разрабатываемому двигателю.

Цель исследования – оценка возможности выбора основных направлений стратегии форсирования и их технической реализации.

## Материалы и методы

Рассмотрим возможную стратегию принятия решения по составу системы нейтрализации при форсировании дизеля.

Шестицилиндровый двигатель ЯМЗ-6566 относится к семейству V-образных дизелей, включающему несколько вариантов исполнения с номинальными мощностями от 230 до 300 л.с. Семейство включает двигатели в конфигурации V-8 с соотношением хода поршня к диаметру цилиндра  $S/D$  130×140, с диапазоном мощностей 330–420 л.с. (табл. 1).

Семейство V-образных двигателей ЯМЗ имеет давнюю историю и неоднократно подвергалось модернизации. Последние версии двигателей оснащены современной системой питания с общей топливной магистралью и современной системой управления. Требования Евро-4 на этом двигателе достигаются применением системы SCR.

Основные направления совершенствования рабочего процесса заключаются в мероприя-

тиях, приведенных в табл. 2. Результаты работ существенно влияют на «сырой» выброс двигателя, но окончательное соответствие экологическим нормам устанавливается системой нейтрализации двигателя

Результаты мероприятий в сочетании с вариантами системы нейтрализации и применения EGR представлены на рис. 1. Существенное увеличение давления в топливной рампе и давления впрыска способно привести к упрощению состава системы нейтрализации при высоких экологических показателях. Но это технически сложно реализуемо и существенно увеличивает стоимость системы питания дизеля.

Сравнительный технический и экономический анализ решений применяемых при форсировании систем нейтрализации приведен в табл. 3.

Уровень форсирования прототипа относительно современных двигателей в комплектациях Евро-4, Евро-5,6 ниже по сравнению с основными параметрами двигателей прототипов. Данные показывают, что производители дизельных двигателей активно используют все доступные технические решения EGR, SCR, DPF и другие для достижения актуальных экологических норм. Однако необходимо отметить следующее: при выборе в качестве базового решения варианта с системой рециркуляции

Таблица 1

Характеристики базового двигателя ЯМЗ 6566

Показатель	Значения
Диаметр и ход поршня, мм	130×140
Рабочий объем двигателя, л	11,15
Номинальная мощность, брутто, кВт (л.с.)	198,6 (270)
Полезная мощность (Правила ООН № 85), кВт (л.с.)	197 (269)
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1900
Максимальный крутящий момент, брутто, Н·м (кгс·м)	1275 (130)

Таблица 2

Направления работ, направленных на достижение экологических норм

Направление работ	Stage 3b (Евро-4)	Stage 4 (Евро-5)	Stage 5 (Евро-6)
Камера сгорания/ степень сжатия	Оптимизация формы камеры сгорания, $e = 17...18$	Оптимизация формы камеры сгорания, $e = 18...19$	Оптимизация формы камеры сгорания, $e > 19$
Стратегия впрыска	Многоразовый 3...4 впрыска/цикл, $P_{inj} = 1600$ бар	Многоразовый 5...8 впрысков/цикл, $P_{inj} = 1800$ бар	Многоразовый 5...8 впрысков/цикл, управление передним фронтом, $P_{inj} > 2000$ бар
Турбонаддув	Регулируемый 1-ступенчатый, $P_k = 1,8...2$ бар	Регулируемый 1-ступенчатый, $P_k = 2...2,2$ бар	Регулируемый 2-ступенчатый, $P_k = 2,2...2,8$ бар

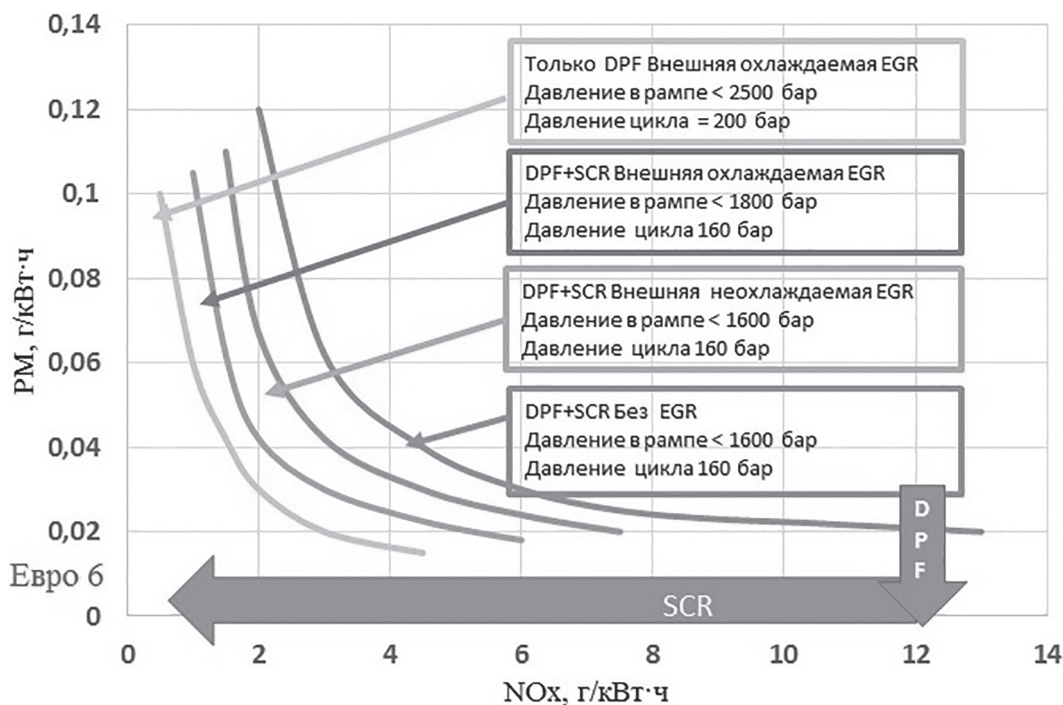


Рис. 1. Варианты конструкций экологических систем

Таблица 3

Сравнительный анализ решений для форсирования систем нейтрализации дизельных двигателей

Критерии оценки	SCR	Рециркуляция без охлаждения и SCR	Рециркуляция с пром. охлаждением и SCR
Сложности компоновки	Нейтрально	Позитивно	Негативно
Надежность двигателя	Позитивно	Нейтрально	Негативно
Надежность системы	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально
Технический риск реализации	Нейтрально	Негативно	Позитивно
Стоимость двигателя	Позитивно	Нейтрально	Негативно
Стоимость системы	Негативно	Нейтрально	Негативно
Расход топлива	Позитивно	Нейтрально	Нейтрально
Расход мочевины	Негативно	Позитивно	Позитивно
Расход топлива на регенерацию фильтра	Позитивно	Позитивно	Нейтрально
Возможность форсирования системы	Позитивно	Негативно	Позитивно
Стоимость разработки	Негативно	Нейтрально	Негативно
Сложность калибровки	Позитивно	Нейтрально	Негативно

EGR для достижения высокого экологического класса приходится применять сочетание EGR с селективным восстановлением оксидов азота SCR. При выборе в качестве базового решения SCR возможно достижение уровня Евро-6 без применения систем рециркуляции. Данный вывод существенен для анализа стратегии достижения промежуточного экологического класса Евро-5, что, как было показано выше, актуально для российских условий. Конструирование систем рециркуляции на практике

приводит к существенному изменению компоновки двигателя и связано с большими материальными и временными затратами.

Приведенные данные позволяют проследить тенденции изменения литровой мощности в зависимости от внедрения очередных экологических требований (рис. 2). Производители двигателей уделяют больше внимания вопросам улучшения топливной экономичности, снижению массы и увеличению межсервисных пробегов.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

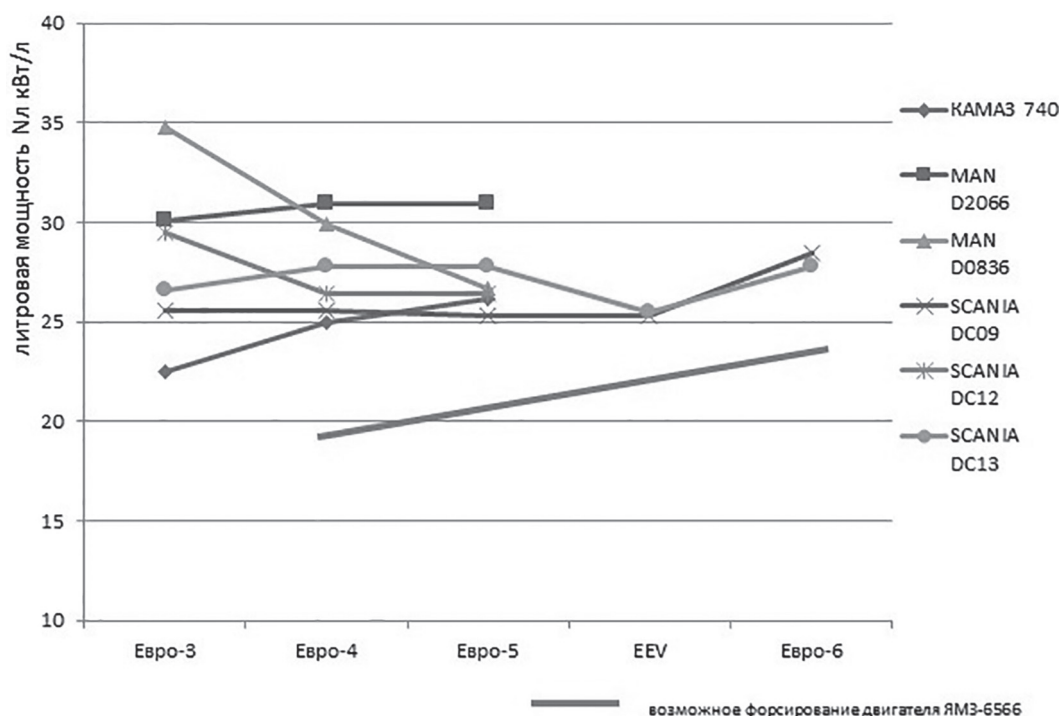


Рис. 2. Зависимость литровой мощности от уровня экологических требований для современных двигателей грузовых автомобилей классов 4...6

Двигатель-прототип ЯМЗ-6566 имеет потенциал для форсирования, ограниченный прочностью деталей цилиндропоршневой группы. В настоящий момент величина литровой мощности этого двигателя (19,8 кВт/л) находится ниже среднестатистической (21,97 кВт/л) по парку грузовых автомобилей для двигателей со сравнимым рабочим объемом.

Оценим возможный диапазон для дальнейшего форсирования с учетом выполнения экологических требований Евро-5 и Евро-6.

Для определения потенциала прототипа в отношении выполнения экологических требований Евро-5 и Евро-6 необходимо оценить необходимую эффективность проектируемой системы последующей обработки отработавших газов (СПООГ). С этой целью, на основе имеющихся данных по прототипу и аналогичным двигателям (табл. 4), построим зависимость выбросов РМ от  $\text{NO}_x$ .

Используя результаты испытаний двигателей КАМАЗ-740.64-420 и КАМАЗ-740.73-400

Таблица 4

Интегральные «сырые» удельные выбросы двигателей КАМАЗ и ЯМЗ, вычисленные по методике Правил 49 с учетом весовых коэффициентов режимов циклов ESC (данные испытаний по адаптации изделий НТЦ МСП)

Тест	Удельные выбросы вредных веществ с ОГ, г/кВтч				Двигатели
	$\text{NO}_x$	СН	СО	РТ	
ESC	7,69	0,06	1,27	0,016	КАМАЗ-740.64-420
ESC	7,96	0,07	1,11	0,014	
ESC	7,97	0,04	1,44	0,016	
ESC	8,04	0,04	1,01	0,015	
ESC	8,17	0,04	1,06	0,015	
ESC	8,49	0,2	0,72	0,016	
ESC	9,36	0,05	1,01	0,015	КАМАЗ-740.73-400
ESC	7,1	0,05	0,8	0,019	
ESC	9	0,3	1	0,018	ЯМЗ-6566

как облако точек на плоскости  $\text{NO}_x$ –PM, определены коэффициенты аппроксимирующего уравнения вида  $Y = a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + e$ .

Затем смещаем кривую

$$\text{PM} = 0,0029 \cdot \text{NO}_x^4 - 0,00959 \cdot \text{NO}_x^3 + 1,2036 \cdot \text{NO}_x^2 - 6,69799 \cdot \text{NO}_x + 13,9661 \quad (1)$$

до совпадения с известным результатом испытаний двигателя-прототипа ЯМЗ-6566 (рис. 3).

Как показывает рисунок, система SCR способна обеспечить достижение требований Евро-5 при эффективности 88 %. Дальнейшее развитие СПООГ под требования Евро-6 возможно только с применением системы фильтрации частиц с эффективностью не ниже 50 % и системы снижения  $\text{NO}_x$  с эффективностью более 95 %.

Такие уровни очистки обеспечивают только современные системы DPF и SCR. Форсирование двигателя при росте выбросов  $\text{NO}_x$  до уровня 10–11 г/кВт·ч, потребует еще большей эффективности СПООГ в отношении  $\text{NO}_x$  (до 97 %) с возможным применением системы EGR.

### Результаты и обсуждение

Таким образом, форсирование двигателя ЯМЗ-6566 по предварительным данным предполагает разработку высокоэффективной СПООГ с использованием полного комплекса технологий очистки – DPF+SCR для обеспечения соответствия требованиям Евро-6 при отказе от использования EGR.

Во ФГУП НАМИ была проведена отработка системы нейтрализации для двигателя ЯМЗ-6566 (рис. 4) по прогнозу стратегии, описанной выше. В основе проведенных работ лежала созданная комплексная методика разработки, включающая расчетные и опытные методики доводки характеристик системы последующей обработки отработавших газов: газодинамических, тепловых, кинетических и акустических.

Проведен большой объем отработки участков впрыска мочевины, гидролиза и термолиза, различных конфигураций каталитических блоков.

Предварительно оценивалась эмиссия отдельных токсичных компонентов с отработавшими газами дизеля ЯМЗ-6566, не оснащенного какими-либо антитоксичными устройствами (т.н. «сырой выброс»), после чего монтировались и испытывались в соответствии с разработанными методиками системы нейтрализации и подсистемы управления регенерацией и блоком селективной очистки.

### Заключение

Проведенные исследования подтвердили правильность выбранной стратегии на основе созданной многопараметрической диффузионной модели и синтезированной конструкции.

На рис. 5 показано сравнение эффективности конверсии  $\text{NO}_x$  синтезированной конструкции (вариант с 16-блочным нейтрализатором), 96,6 % по сравнению с типовым вариантом (вариант DOC+DPF+SCR) – 87,5 %.

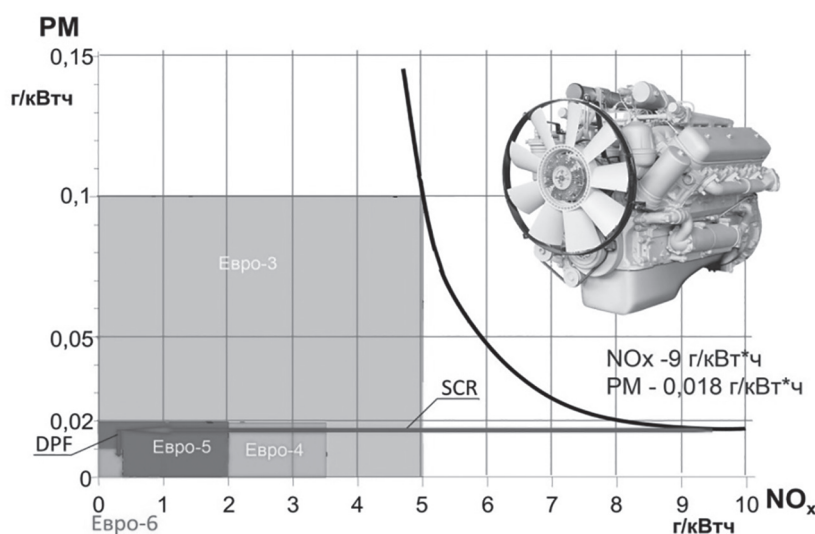


Рис. 3. Аппроксимированная кривая  $\text{NO}_x$ –PM для двигателя-прототипа ЯМЗ-6566

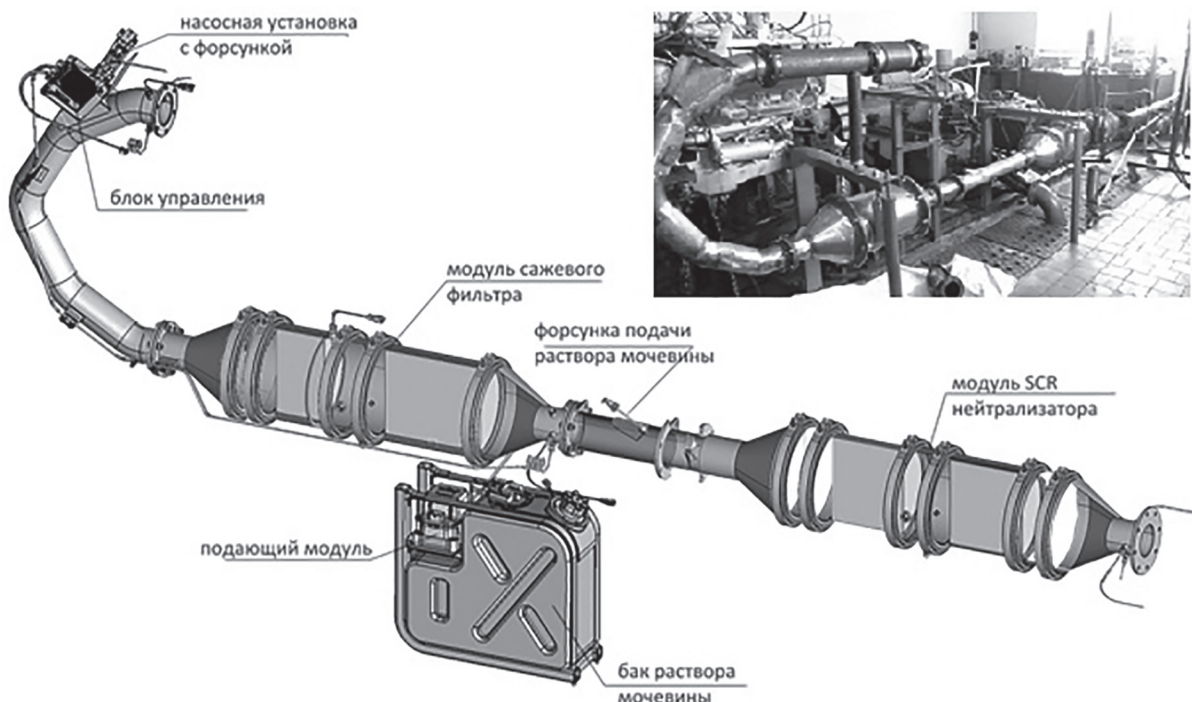


Рис. 4. Опытная установка СПООГ для ЯМЗ-6566 (моторный бокс №17 ФГУП НАМИ)

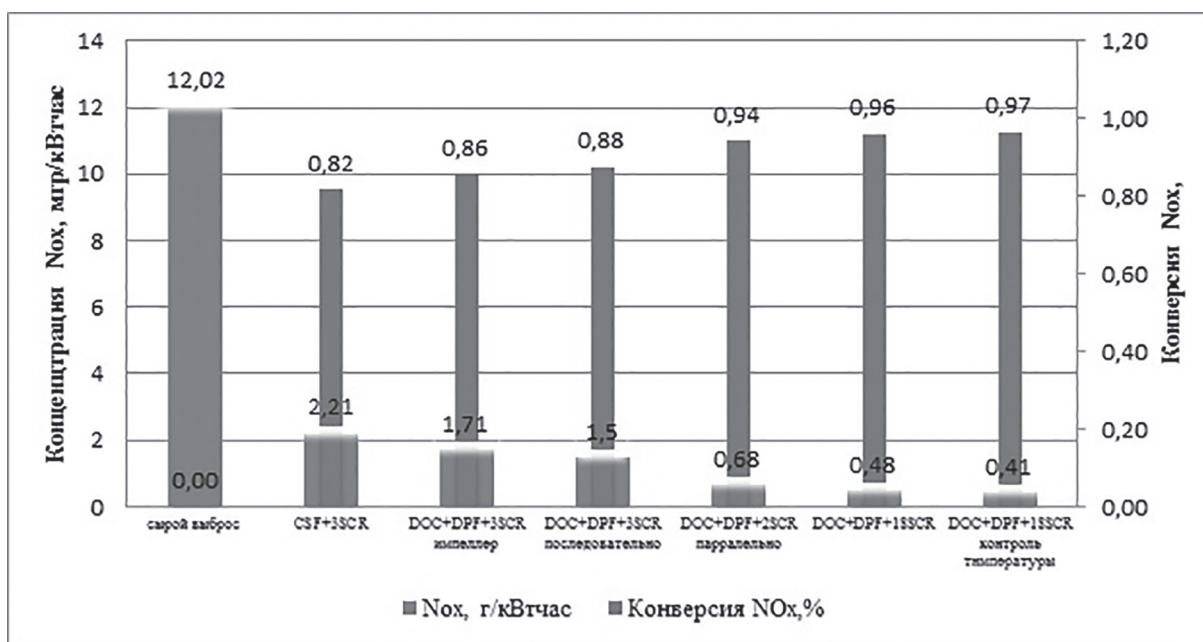


Рис. 5. Эффективность мероприятий по форсированию СПООГ ЯМЗ 6566

Полученный результат показывает возможность существенного снижения токсичности ОГ на практически неподготовленном двигателе.

Подтверждена возможность принятия стратегических решений по форсированию системы нейтрализации и последующая их техническая реализация при достижении поставленных, как цели, значений экологических показателей двигателя.

### Литература

1. Козлов А.В., Теренченко А.С., Васильев А.В. Анализ экологических требований «евро-6» к автомобильным двигателям // Журнал автомобильных инженеров.
2. Кутенев В.Ф., Кисуленко Б.В., Шюте Ю.В. Экологическая безопасность автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. М.: «Машиностроение», 2009. 252 с.

3. Луканин В.Н. Промышленно-транспортная экология / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2001. 273 с.
4. Корнилов Г.С., Панчишный В.И. Физико-химические методы обезвреживания отработавших газов дизелей // Автомобильная промышленность. 1998. № 11. С. 14–16.
5. Корнилов Г.С., Моисеев С. П., Панчишный В.И., Табачник А.А. Фильтр-нейтрализатор для дизелей // Проблемы конструкции двигателей и экология: сб. науч. тр. НАМИ. М., 1998. С. 34–39.
6. Корнилов Г.С. Теоретическое и экспериментальное обоснование способов улучшения экологических показателей и топливной экономичности автомобильных дизелей: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02
7. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 376 с.
8. Кульчицкий А.Р. Исследование процессов образования и разработка методов снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей внедорожных машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. Владимир, 2006. 34 с.
9. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка альтернативных топлив по полному жизненному циклу // Приводная техника. 2000. № 5. С. 24–29.
10. Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. М.: НАМИ, 2001. 248 с.
11. Шатров М.Г. Формирование компонентов единого информационного пространства для обеспечения жизненного цикла двигателей внутреннего сгорания: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. М., 2006. 403 с.
12. Chatterjee D. Detailed surface reaction mechanism in a three-way catalyst // Faraday Discussions. 2002. Vol. 119. P. 371–384.
13. Nadareishvili G.G. Three-Way Catalyst Modeling For the Gas Engine // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7. № 4. P. 1579–1588.
14. Pontikakis G.N. Mathematical modelling of catalytic exhaust systems for EURO-3 and EURO-4 emissions standards // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2001. Vol. 215. № 9. P. 1005–1015.
15. Next Generation Three-Way Catalysts for Future, Highly Efficient Gasoline Engines [Electronic resource] // Christine Lambert Ford Research and Advanced Engineering 9-June-2016. Mode of access: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/pm067\\_lambert\\_2016\\_o\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/pm067_lambert_2016_o_web.pdf).
16. Каминский В.Н., Лоик А.В., Титченко А.Ю., Аликин Е.А., Надарейшвили Г.Г., Щеглов П.А. Применение накопительных нейтрализаторов оксидов азота для снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 11. С. 3–7.
17. Камнев В.Ф., Надарейшвили Г.Г., Щеглов П.А. Принципы построения математической модели современного дизеля с комплексной системой снижения вредных выбросов // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 2 (35). С. 81–86.
18. Панчишный В.И., Надарейшвили Г.Г., Юдин С.И. Разработка устройств перемешивания – импеллеров в системе селективного восстановления оксидов азота тяжелых дизельных двигателей // Труды НАМИ. 2015. № 261. С. 28–42.
19. Лукшо В.А., Панчишный В.И., Неволин И.В., Ширяев А.В., Сазонов А.В., Юдин С.И. Устройство очистки отработавших газов двигателя транспортного средства: патент 2612306 РФ, МПК F01N; опубл. 06.03.2017, бюл. № 1.

## References

1. Kozlov A.V., Terenchenko A.S., Vasil'ev A.V. Euro-6 environmental requirements analysis for automobile engines. ZHurnal avtomobil'nyh inzhenerov (in Russ.).
2. Kutenev V.F., Kisulenko B.V., SHyute YU.V. Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobilej s dvigatelyami vnutren-nego sgoraniya [Ecological safety of vehicles with internal combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 252 p.
3. Lukanin V.N. Promyshlenno-transportnaya ekologiya [Industrial and transport ecology]. Pod red. V.N. Lukanina. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 273 p.
4. Kornilov G.S., Panchishnyj V.I. Physico-chemical methods for the disposal of diesel exhaust gases. Avtomobil'naya promyshlennost'. 1998. No 11, pp. 14–16 (in Russ.).
5. Kornilov G.S., Moiseev S.P., Panchishnyj V.I., Tabachnik A.A. Filter converter for diesel engines: Sb. nauch. tr. NAMI. Moscow, 1998, pp. 34–39 (in Russ.).
6. Kornilov G.S. Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie sposobov uluchsheniya ekologicheskikh pokazatelej i toplivnoj ekonomichnosti avtomobil'nyh dizelej: dissertaciya... doktora tekhnicheskikh nauk [Theoretical and experimental justification of ways to improve environmental performance and



- fuel efficiency of automotive diesel engines: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]: 05.04.02
7. Markov V.A., Bashirov P.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej [Diesel exhaust toxicity]. Mos-cow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 376 p.
  8. Kul'chickij A.R. Issledovanie processov obrazovaniya i razrabotka metodov snizheniya vybrosov vrednyh veshchestv s otrabotavshimi gazami dizelej vnedorozhnyh mashin: avtoreferat dis.... doktora tekhnicheskikh nauk [Study of the processes of formation and development of methods for reducing emissions of harmful substances from the exhaust gases of diesel engines of off-road vehicles: Abstract for Dissertation for Degree of Dr.Eng.]: 05.04.02. Vladimir, 2006. 34 p.
  9. Zvonov V.A., Kozlov A.V., Terenchenko A.S. Life-cycle alternative fuel assessment. Privodnaya tekhnika. 2000. No 5, pp. 24–29 (in Russ.).
  10. Zvonov V.A., Kozlov A.V., Kutenev V.F. Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobilya v polnom zhiznennom cikle [Ecological safety of the vehicle in a full life cycle]. Moscow: NAMI Publ., 2001. 248 p.
  11. SHatrov M.G. Formirovanie komponentov edinogo informacionnogo prostranstva dlya obespecheniya zhiznennogo cikla dvigatelej vnutrennego sgoraniya: dissertaciya... doktora tekhnicheskikh nauk [The formation of the components of a single information space to ensure the life cycle of internal combustion engines: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]: 05.04.02. Moscow, 2006. 403 p.
  12. Chatterjee D. Detailed surface reaction mechanism in a three-way catalyst // Faraday Discussions. 2002. Vol. 119, pp. 371–384.
  13. Nadareishvili G.G. Three-Way Catalyst Modeling For the Gas Engine // Research Journal of Pharmaceutical, Bio-logical and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, No 4, pp. 1579–1588.
  14. Pontikakis G.N. Mathematical modelling of catalytic exhaust systems for EURO-3 and EURO-4 emissions stand-ards // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2001. Vol. 215, No 9, pp. 1005–1015.
  15. Next Generation Three-Way Catalysts for Future, Highly Efficient Gasoline Engines [Electronic resource] // Christine Lambert Ford Research and Advanced Engineering 9-June-2016. Mode of access: [https://www.energy.gov/sit-es/prod/files/2016/06/f33/pm067\\_lambert\\_2016\\_o\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sit-es/prod/files/2016/06/f33/pm067_lambert_2016_o_web.pdf).
  16. Kaminskij V.N., Loik A.V., Titchenko A.YU., Alikin E.A., Nadarejshvili G.G., SHCHeglov P.A. The use of nitrogen oxide storage converters to reduce the exhaust emissions of tractor diesel engines. Traktory i sel'hozmashiny. 2016. No 11, pp. 3–7 (in Russ.).
  17. Kamenev V.F., Nadarejshvili G.G., SHCHeglov P.A. The principles of building a mathematical model of a modern diesel engine with an integrated system for reducing harmful emissions. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2016. No 2 (35), pp. 81–86 (in Russ.).
  18. Panchishnyj V.I., Nadarejshvili G.G., YUdin S.I. Development of mixing devices – impellers in the selective re-duction system of nitrogen oxides of heavy diesel engines. Trudy NAMI. 2015. No 261, pp. 28–42 (in Russ.).
  19. Luksho V.A., Panchishnyj V.I., Nevolin I.V., SHiryayev A.V., Sazonov A.V., YUdin S.I. Patent No 2612306 RF, MPK F01N. Ustrojstvo ochistki otrabotavshih gazov dvigatelya transportnogo sredstva [Vehicle engine exhaust gas purification device]. Opubl. 06.03.2017. Byul. No 1.