

УДК 621.331:502.3

## Применение накопительных нейтрализаторов оксидов азота для снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей Application of storage catalytic converters of nitrogen oxides for reducing exhaust toxicity of tractor diesel engines

В. Н. КАМИНСКИЙ<sup>1</sup>, д-р техн. наук  
А. В. ЛОИК<sup>1</sup>, инж.  
А. Ю. ТИТЧЕНКО<sup>1</sup>, инж.  
Е. А. АЛИКИН<sup>2</sup>, канд. хим. наук  
Г. Г. НАДАРЕЙШВИЛИ<sup>3</sup>, канд. техн. наук  
П. А. ШЧЕГЛОВ<sup>3</sup>, инж.

<sup>1</sup> АО "НПО "Турботехника", Протвино, Россия,  
turbo@kamturbo.ru

<sup>2</sup> ООО "Экоальянс", Новоуральск, Россия,  
sales@eco-nu.ru

<sup>3</sup> Государственный научный центр  
Российской Федерации "НАМИ",  
Москва, Россия, info@nami.ru

V. N. KAMINSKIY<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
A. V. LOIK<sup>1</sup>, Engineer  
A. Yu. TITCHENKO<sup>1</sup>, Engineer  
E. A. ALIKIN<sup>2</sup>, PhD in Chemistry  
G. G. NADAREYSHVILI<sup>3</sup>, PhD in Engineering  
P. A. SHCHEGLOV<sup>3</sup>, Engineer

<sup>1</sup> NPO Turbotekhnika, JSC, Protvino, Russia,  
turbo@kamturbo.ru

<sup>2</sup> Ekoal'yans, LLC, Novouralsk, Russia,  
sales@eco-nu.ru

<sup>3</sup> Central research and development automobile  
and engine institute NAMI, Moscow, Russia,  
info@nami.ru

Снижение вредного воздействия сельскохозяйственной техники на экосферу — важная задача, выполнение которой требует широкого внедрения средств снижения вредных выбросов. Соблюдение современных требований законодательства приводит к росту стоимости применяемых систем нейтрализации отработавших газов дизелей. Особенно это касается систем, требующих подачи в выпускную систему дополнительного реагента. Фактор стоимости стал определяющим при выборе цели данной работы — создания прототипа альтернативной системы нейтрализации для выбранного типа двигателя с возможностью быстрой адаптации под другой тип в рамках данного класса мощности. В статье рассматриваются принципы работы каталитической системы нейтрализации оксидов азота накопительного типа, особенности конструкции системы для тракторного двигателя. Важное преимущество такой системы заключается в том, что нет необходимости использовать дополнительный реагент. Проведены экспериментальные исследования прототипа нейтрализатора в составе серийного двигателя на моторном стенде, а также испытания образцов каталитических блоков с различными вариантами каталитического покрытия на безмоторной газоаналитической установке. В результате испытаний и работ по подбору оптимального каталитического покрытия создана новая система подачи топлива с увеличенной производительностью, изменена конструкция нейтрализатора, рекомендуемая для сельскохозяйственной техники. Накопительная система нейтрализации позволяет снизить выбросы оксидов азота на 40—50 %. При такой эффективности системы ее стоимость заметно ниже, чем стоимость системы селективного каталитического восстановления. Предлагаемое конструкционное исполнение позволяет приспособить накопительную систему к двигателю любого класса мощности без изменения каких-либо систем и вмешательства в алгоритмы управления. Определены оптимальные области применения накопительных систем.

**Ключевые слова:** оксиды азота; нейтрализация отработавших газов; накопительный нейтрализатор.

Reduction of harmful effects of agricultural machinery on the ecosphere is an important task; its solution requires extensive use of emission reducing devices. Compliance with up-to-date legal requirements causes the cost increase of systems of diesel exhaust gases aftertreatment. This applies especially the systems that require an additional reagent feeding into exhaust system. The cost factor determines the study aim that is the creation of prototype of alternative aftertreatment system for selected engine type with the possibility of rapid adaptation to other types of the same power class. The article considers the operating principles of a storage-type system of catalytic reduction of nitrogen oxides, the design features of the system for tractor engine. An important advantage of this system is the fact that there is no need for additional reagent. The experimental studies of converter prototype as part of series-production engine were conducted on the engine test bench. In addition, the tests of samples of catalyst bricks with different types of catalytic coating were carried out. As a result of testing and selection of optimal catalytic coating, the new fuel supply system with increased performance is obtained and the converter design recommended for agricultural machinery is modified. The storage catalytic converter system allows to reduce the nitrogen oxides emissions by 40—50 %. With such efficiency of the system, its cost is noticeably lower than the cost of the system of selective catalytic reduction. The proposed design allows to adapt the storage system to engines of any power class without change in systems and control algorithms. The optimal field of application of storage systems is determined.

**Keywords:** nitrogen oxides; exhaust gases aftertreatment; storage catalytic converter; lean nitrogen oxides trap.

## Введение

Сегодня актуальность внедрения систем снижения вредных выбросов на технике для сельского хозяйства не вызывает сомнений. Это связано с длительными периодами работы тракторов и других машин в непосредственной близости от посевов.

Российские и зарубежные требования по ограничению выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) двигателей вынуждают производителей применять различные комплексы антиоксидных систем [1]. Оптимизация процесса сгорания не позволяет снизить количество вредных веществ до уровней, необходимых для выполнения законодательных требований. Что касается снижения содержания оксидов азота, то последствия оптимизации сгорания приводят к обратному результату.

## Цель исследования

Цель исследования — анализ работы и совершенствование конструкции накопительных нейтрализаторов оксидов азота для снижения токсичности ОГ тракторных дизелей.

## Материалы и методы

В двигателях, работающих на стехиометрических смесях, используются трехкомпонентные каталитические нейтрализаторы (Three-Way Catalyst), в которых происходит одновременное окисление оксида углерода CO, несгоревших углеводородов CH и восстановление оксидов азота NO<sub>x</sub>.

В двигателях, работающих на обедненных смесях, в первую очередь в дизелях, помимо перечисленных компонентов необходимо снижать выбросы частиц PM (Particulate Matter), для чего используется сажевый фильтр (Diesel Particulate Filter, DPF). Эффективность восстановления NO<sub>x</sub> трехкомпонентным нейтрализатором в выпускной системе таких двигателей значительно снижается из-за присутствия кислорода в ОГ. В этом случае для нейтрализации CO и CH используется окислительный каталитический нейтрализатор. Для нейтрализации NO<sub>x</sub> применяются системы, работающие в условиях дефицита восстановительной среды.

На грузовых автомобилях наиболее распространена система селек-

тивного каталитического восстановления (Selective Catalytic Reduction, SCR) оксидов азота с использованием впрыска раствора мочевины (Urea-SCR) в систему выпуска [2]. Такая система имеет высокую стоимость, требует наличия на борту дополнительного бака с раствором мочевины (AdBlue) и его периодической заправки.

Также существует технология селективного каталитического восстановления NO<sub>x</sub> углеводородами, т.е. основным топливом (HC-SCR). Ее применение затруднено из-за узкого температурного окна эффективной работы нейтрализатора.

Вторая по распространенности после SCR — система снижения содержания оксидов азота накопительного типа (Lean-NO<sub>x</sub> Trap, LNT) [2]. Нейтрализатор в этой системе содержит сотовый керамический блок, на подложку (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) которого нанесены катализатор из группы редкоземельных металлов и адсорбирующее вещество, так называемая ловушка — щелочной или щелочноземельный оксид (например BaO). В настоящее время исследования различных конструктивных вариантов систем LNT занимают видное место в общем объеме публикаций по темам нейтрализации ОГ дизелей [3].

Процесс работы накопительного нейтрализатора NO<sub>x</sub> имеет циклический характер. Он включает этапы накопления и регенерации, следующие друг за другом. Основные механизмы накопления и регенерации схематично представлены на рис. 1.

Первый этап происходит при избытке кислорода в ОГ. При этом часть NO доокисляется до NO<sub>2</sub> на каталитическом покрытии и затем адсорбируется на покрытии ловушки

с образованием нитритов и нитратов на поверхности активных центров.

В процессе работы нейтрализатора происходит насыщение центров, — они заполняются адсорбированными веществами, и их способность удерживать поступающие оксиды азота ухудшается, из-за чего концентрация NO<sub>x</sub> на выходе из нейтрализатора растет до уровня начальных значений. При заполнении емкости ловушки до заданного уровня блок управления подает сигнал к проведению регенерации.

Система регенерации обеспечивает формирование восстановительной среды для нейтрализации NO<sub>x</sub>, содержащихся в потоке ОГ и образующихся в процессе десорбции. Практически метод регенерации реализуется с помощью подачи дополнительного топлива в поток ОГ, благодаря чему достигается эффект обогащения смеси. При этом используются либо возможности многостадийного впрыска топлива самим двигателем (поствпрыск), либо дозированная подача вторичного топлива от отдельного насоса непосредственно на вход нейтрализатора.

В этих условиях происходит реакция распада нитритов и нитратов и высвобождение (десорбция) накопленных оксидов азота с поверхности покрытия каталитического блока в газовую фазу. Далее на поверхности каталитического покрытия оксиды азота NO<sub>x</sub> восстанавливаются до N<sub>2</sub>.

Несмотря на повсеместное внедрение систем SCR в составе транспортных двигателей, существует спрос на альтернативные решения с меньшей стоимостью. Определяющий фактор в выборе таких систем — отсутствие необходимости использования каких-либо дополнительных реагентов.

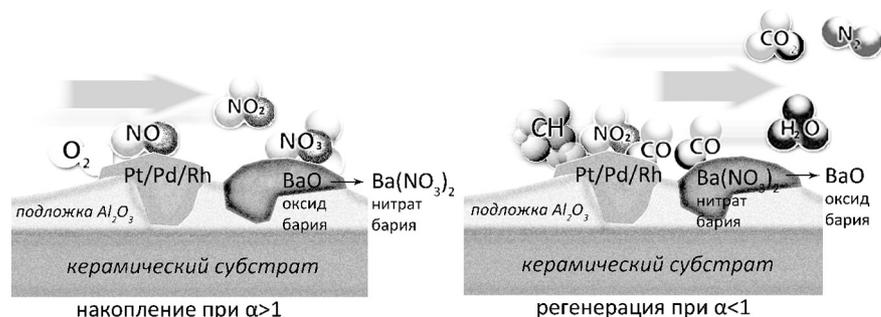


Рис. 1. Принцип работы накопительного нейтрализатора NO<sub>x</sub>

АО "НПО "Турботехника", ООО "Экоальянс" и ФГУП "НАМИ" объединили усилия в разработке накопительной системы нейтрализации.

Для первоначальной установки прототипа системы выбран тракторный двигатель Минского моторного завода (ММЗ) Д-243. Этим выбором определен набор специфических требований к размещению системы и методам управления.

В задачи работы входили:

- разработка конструкции прототипа накопительной системы нейтрализации для выбранного типа двигателя с возможностью быстрой адаптации под другие типы двигателей того же класса мощности;

- подтверждение возможности достижения 30 %-й величины эффективности снижения содержания  $\text{NO}_x$  при работе системы по испытательному циклу NRSC для выполнения требований Директивы 2000/25/ЕС;

- определение конфигурации опытного образца системы по результатам испытаний прототипа.

АО "НПО "Турботехника" изготовило прототип LNT-нейтрализатора для двигателя ММЗ Д-243, основные параметры которого приведены ниже.

#### Параметры двигателя ММЗ Д-243

Рабочий объем, л . . . . .	4,75
Номинальная мощность, кВт . . . . .	60
Частота вращения при номинальной мощности, $\text{мин}^{-1}$ . . . . .	2200
Максимальный крутящий момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$ . . . . .	278
Тип системы топливоподачи . . . . .	Механический топливный насос высокого давления
Сырая эмиссия при выполнении испытательного цикла NRSC:	
CO . . . . .	0,12
THC . . . . .	0,14
$\text{NO}_x$ . . . . .	5,67
PM . . . . .	0,304

Конструкция нейтрализатора представлена на рис. 2. Внутри корпуса последовательно установлены два каталитических блока производства ООО "Экоальянс" (г. Новоуральск). Нейтрализатор устанавливается непосредственно на выпускной коллектор двигателя. Процесс

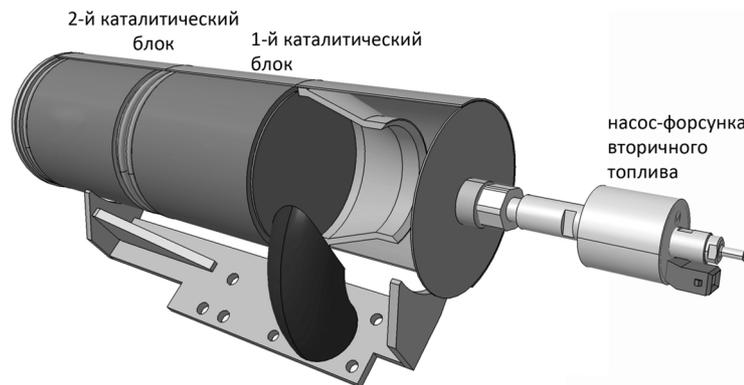


Рис. 2. Прототип нейтрализатора LNT

регенерации осуществляется путем впрыска топлива в нейтрализатор через насос-форсунку. Дозирование вторичного топлива обеспечивается с помощью изменения частоты прямоугольных импульсов, подаваемых на соленоид плунжерного насоса от блока управления.

Испытания прототипа проводились на моторном стенде ОАО "УКХ "ММЗ" (г. Минск) на двух режимах стационарного 8-ступенчатого цикла NRSC в соответствии с требованиями Директивы 2000/25/ЕС. Контролировались концентрации  $\text{NO}_x$  и  $\text{O}_2$  (с помощью датчика  $\text{NO}_x$ ) и температура на выходе нейтрализатора.

На режиме  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M = 140 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при уровне сырого выброса  $\text{NO}_x$  512 ppm среднее значение концентрации  $\text{NO}_x$  на протяжении всего испытания составило 490 ppm, что соответствует средней эффективности 4,3 %.

На режиме  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M = 210 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при уровне сырого выброса  $\text{NO}_x$  760 ppm среднее значение концентрации  $\text{NO}_x$  на протяжении времени испытания составило 770 ppm.

Несмотря на низкую эффективность прототипа, предварительные испытания подтвердили возможности новой технологии по накоплению и регенерации оксидов азота. В ходе испытаний установлены причины низкой эффективности прототипа:

- недостаточная подача вторичного топлива;
- высокая степень неравномерности распределения вторичного топлива по сечению каталитического блока;
- недостаточная восстановительная способность выбранного типа каталитического покрытия.

Для достижения необходимой эффективности системы принят комплекс мер по снижению средней концентрации  $\text{NO}_x$  и расхода вторичного топлива за цикл регенерации.

Специалистами ООО "Экоальянс" разработан новый тип каталитического покрытия. Экспериментальные исследования проведены на безмоторной газоаналитической установке при продувке образцов катализаторов модельной смесью газов. В качестве восстановительной среды в основной поток  $G = 25 \text{ л/мин}$  подавался CO (2 % об.).

#### Результаты и их обсуждение

Первый образец покрытия LNT1 испытан в составе прототипа нейтрализатора на моторном стенде ММЗ. На графике, полученном с безмоторной установки, отчетливо видны десорбционные пики (рис. 3, а) концентраций  $\text{NO}_x$ , сводящие на нет эффективность покрытия в зоне сорбции. Итоговый образец покрытия с увеличенной загрузкой катализатора получил условное наименование LNT-4. При использовании этого покрытия удалось избавиться от всплесков концентраций  $\text{NO}_x$  на фазе десорбции (рис. 3, б). Максимальная емкость покрытия на двух каталитических блоках составила 6 г. Данное покрытие утверждено к применению на дальнейших образцах и предсерийных изделиях.

Разработана система подачи вторичного топлива с увеличенной производительностью. С целью поддержания максимальной эффективности преобразования  $\text{NO}_x$  система подачи вторичного топлива настраивается на достижение значения коэффициента избытка воздуха  $\lambda = 0,98$  для гарантированного запуска восстановительного процесса. Исходя из па-

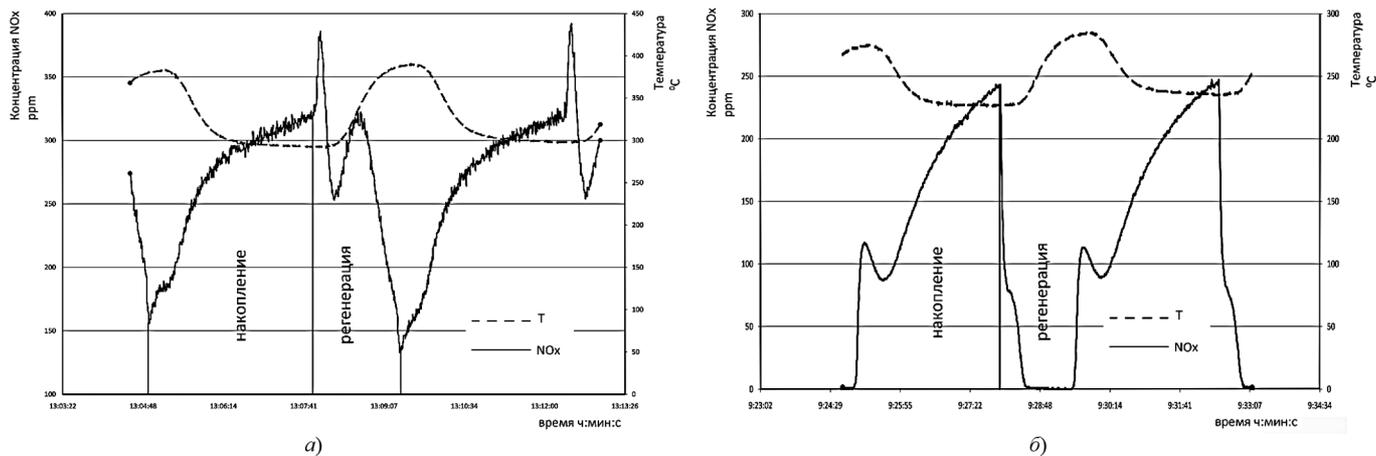


Рис. 3. Результаты испытаний каталитических покрытий LNT1 (а) и LNT4 (б)

раметров топливopодачи двигателя Д-243 определены необходимые расходы вторичного топлива для достижения  $\lambda = 0,98$ . Для обеспечения диапазона расходов 5–18 кг/ч и необходимого давления распыла решено применить шестеренный на-

сос с клапаном аварийной блокировки, срабатывающим по сигналам датчиков температуры (рис. 4).

Изменена конструкция нейтрализатора. Для обеспечения равномерного распределения и достаточного испарения вторичного топлива

использован тангенциальный вход потока в нейтрализатор, обеспечивающий вихревое движение заряда (рис. 5).

Каталитическая схема доработанного нейтрализатора включает два блока с покрытием LNT4. Для расширения температурного диапазона работы катализатора на второй блок добавлена зона с покрытием SCR ( $V_2O_5/TiO_2$ ) для работы в пассивном режиме.

Определен алгоритм работы регенерации. Обычно в качестве обратной связи для регенерации накопительного катализатора используется сигнал датчика  $NO_x$  или сигнал  $\lambda$ -зонда. Однако в данном проекте действуют жесткие ограничения по стоимости системы, поэтому контур регулирования подачи топлива использует сигнал датчика температуры на выходе нейтрализатора. Выбор такого решения основан на эффекте синхронного изменения температуры потока с изменением концентрации  $NO_x$  в фазе сорбции.

Для каждого режима можно определить характерный перепад температур, соответствующий началу накопления  $NO_x$  и достижению насыщения. Опыт применения датчиков для получения косвенных данных был исследован в работе [4]. Показания датчика температуры на входе потока необходимы для оценки работоспособности нейтрализатора и предотвращения перегрева каталитического покрытия.

Двигатель ММЗ Д-243 не оснащен системой электронного управления, поэтому все функции регулирования и диагностики системы нейтрализации могут быть реализо-

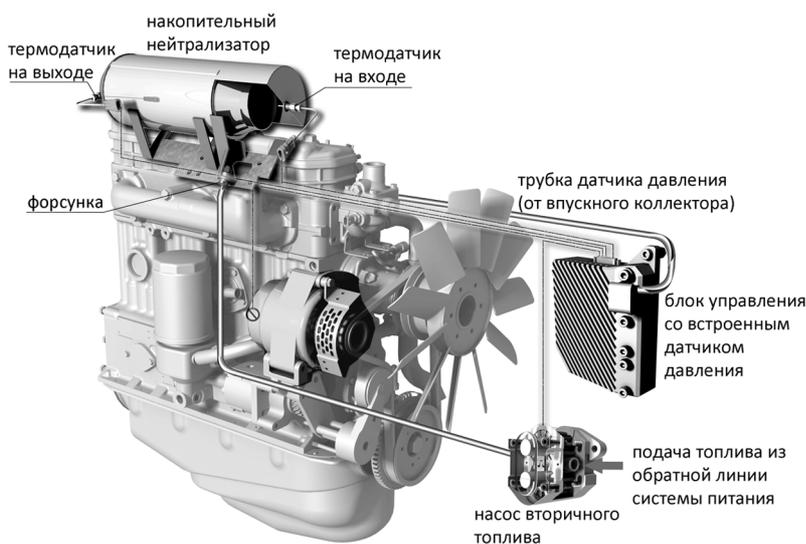


Рис. 4. Система подачи вторичного топлива с шестеренным насосом

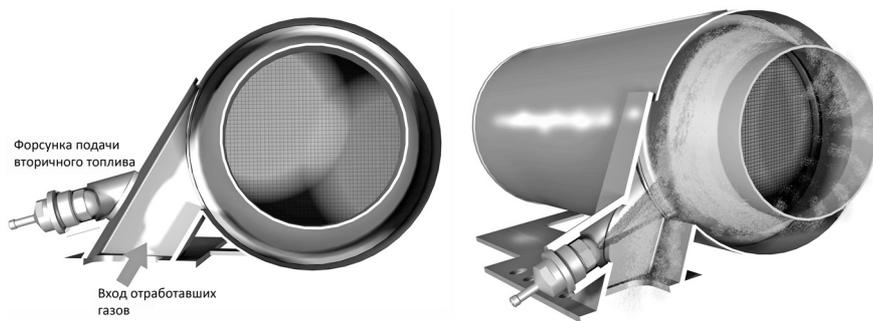


Рис. 5. Доработанная конструкция нейтрализатора

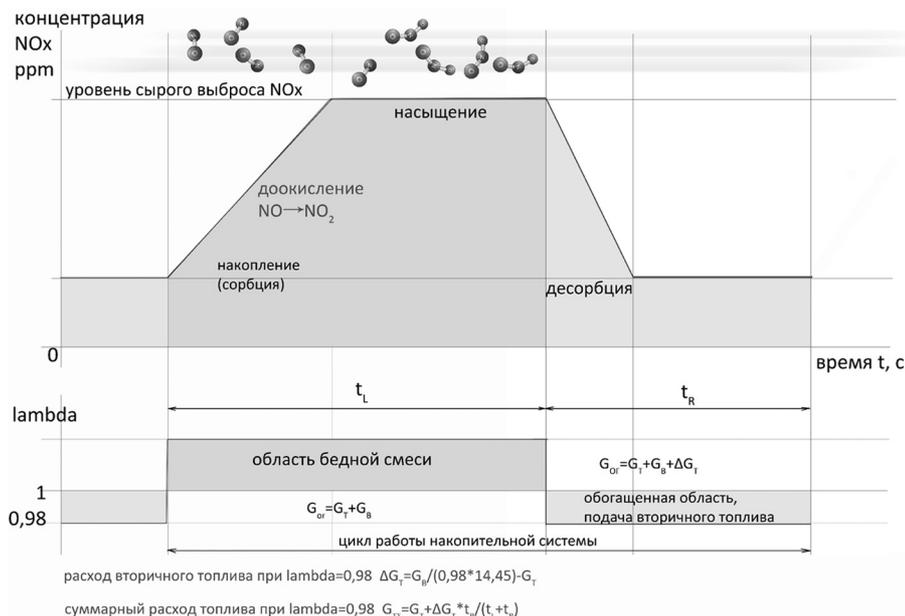


Рис. 6. Упрощенная модель расчета расхода топлива через систему

ваны только автономным блоком управления.

Для экономического обоснования внедрения системы накопительной нейтрализации проведена оценка возможного увеличения расхода топлива при заданной эффективности снижения концентрации NO<sub>x</sub> 40 %. Оценка проведена по упрощенной схеме протекания цикла регенерации с допущением, что скорости сорбции и десорбции (угол наклона кривых) не зависят от режима работы двигателя (рис. 6).

Средние скорости сорбции  $V_c$  и десорбции  $V_d$  определены по результатам продувки на безмоторной установке в ООО "Экоальянс". Расчетная схема [5] позволяет задавать необходимую эффективность  $\epsilon$  на режимах цикла и значения времени подачи вторичного топлива  $t_r$  с расходом, необходимым для достижения  $\lambda = 0,98$ . На выходе расчета — значения промежутка времени между циклами регенерации  $t_i = f(\epsilon; t_r)$  и значение среднего суммарного расхода топлива  $\Sigma G_T = f(t_i; t_r)$ . Моделирование процессов сорбции-десорбции на режимах цикла NRSC позволяет оценить максимально возможную потерю экономичности в 10 % при выполнении испытательного цикла с самым неблагоприятным сочетанием факторов, влияющих на эффективность. В реальных условиях эксплуатации потеря экономичности будет ниже.

## Выводы

1. С помощью накопительной системы нейтрализации можно снизить выбросы NO<sub>x</sub> на 40—50 %. При такой эффективности системы ее стоимость заметно ниже, чем стоимость SCR-системы.

2. Предлагаемое конструктивное исполнение позволяет приспособить систему к двигателю любого класса мощности путем масштабирования объема катализатора без изменения каких-либо систем и вмешательства в алгоритмы управления.

Наряду с основным преимуществом — отсутствием расхода дополнительного реагента в эксплуатации — система обладает таким существенным недостатком, как увеличенный расход топлива. Однако потеря экономичности двигателя с накопительной системой может быть компенсирована в случае необходимости дополнительного использования сажевого фильтра. Компенсация достигается путем совмещения моментов запуска циклов регенерации накопительного катализатора и сажевого фильтра.

3. Оптимальными для применения накопительных систем представляются следующие области:

— модернизируемые действующие парки техники с относительно мягкими требованиями к степени повышения экологического класса;

— новая техника с двигателями, которые оснащены современными системами топливоподачи и рециркуляции ОГ и предназначены для продолжительной эксплуатации в условиях, осложняющих применение дополнительного реагента, например в условиях низких температур;

— двигатели для рынков с жесткими ограничениями по цене техники.

## Литература и источники

1. Надарейшвили Г. Г., Рахматов Р. И., Галевко В. В. и др. Тенденция развития систем обработки отработавших газов современных автомобилей // *Естественные и технические науки*. 2014, № 6 (74). С. 92—96.

2. Pereda-Ayo B., González-Velasco J. R. NOx storage and reduction for diesel engine exhaust aftertreatment // *Diesel engine — combustion, emissions and condition monitoring*. Dr. Saiful Bari (Ed.). InTech, 2013. DOI: 10.5772/55729.

3. Теренченко А. С., Надарейшвили Г. Г., Неволин И. В. Анализ патентной активности и динамика патентования инженерных решений в системах нейтрализации и выпуска отработавших газов в 2000—2015 // *Труды НАМИ*. 2015, вып. 262. С. 126—149.

4. Надарейшвили Г. Г., Демидов А. А., Титченко А. Ю. Контроль концентрации аммиака в системах селективного восстановления оксидов азота дизелей // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015, № 3 (32). С. 42—46.

5. Mollenhauer K., Tschoeke H. *Handbook of diesel engines*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6.

## References

1. Nadareyshvili G. G., Rakhmatov R. I., Galevko V. V., Yudin S. I. Trend of development of exhaust aftertreatment systems in modern automobiles. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 6 (74), pp. 92—96 (in Russ.).

2. Pereda-Ayo B., González-Velasco J. R. NOx storage and reduction for diesel engine exhaust aftertreatment. *Diesel engine — combustion, emissions and condition monitoring*. Dr. Saiful Bari (Ed.). In Tech, 2013. DOI: 10.5772/55729.

3. Terenchenko A. S., Nadareyshvili G. G., Nevolin I. V. Analysis of patent activity and dynamics of patenting engineering solutions in exhaust aftertreatment systems in 2000-2015. *Trudy NAMU*, 2015, no. 262, pp. 126—149 (in Russ.).

4. Nadareyshvili G. G., Demidov A. A., Titchenko A. Yu. Monitoring ammonia concentration in SCR systems for diesel engines. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2015, no. 3 (32), pp. 42—46 (in Russ.).

5. Mollenhauer K., Tschoeke H. *Handbook of diesel engines*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6.