

УДК 621.436

А.А. ДЕМИДОВ, канд. техн. наук  
директор проекта «Дизелестроение» ГНЦ<sup>1</sup>

Г.Г. НАДАРЕЙШВИЛИ, канд. техн. наук  
начальник Управления антитоксичных систем и шумоглушения ГНЦ<sup>1</sup>  
E-mail: givi.nadareyshvili@nami.ru  
<sup>1</sup>ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия

А.Ю. ТИТЧЕНКО  
генеральный директор  
ООО «НТЦ МСП», г. Москва, Россия

Статья поступила 17.04.2015.

## КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ АММИАКА В СИСТЕМАХ СЕЛЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ДИЗЕЛЕЙ

*Сокращение токсичных составляющих в отработавших газах дизельных двигателей до уровня требований ЕВРО 6 — это социально важная и технически сложная комплексная задача. Задача оптимального дозирования раствора мочевины и исключения выхода свободного аммиака за пределы системы нейтрализации очень важна при проектировании системы селективного восстановления оксидов азота дизельного двигателя. В данном исследовании проведен анализ результатов испытаний комплексной системы нейтрализации дизельного двигателя и оценена возможность измерения свободного аммиака датчиками оксида азота. Получена корреляция показаний датчика оксида азота в присутствии свободного аммиака с учетом влияния температуры. Использование результатов в системе управления подачей раствора мочевины позволит упростить состав системы, и, исключить из состава дополнительный окислительный катализатор (так называемый АМОХ — катализатор) и использовать сигналы датчика в системах бортовой диагностики.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, отработавшие газы, оксиды азота, система нейтрализации, мочевины, аммиак, гидролиз, пиролиз, окисление, восстановление, катализатор

Международные и европейские требования по ограничению выбросов вредных веществ от транспортных дизелей развиваются как в количественном отношении, так и по составу контролируемых веществ.

В настоящий момент, из всех типов систем нейтрализации для дизелей, наибольшее распространение получила восстановительная система с подачей раствора мочевины, работающая путем создания в зоне реакции, на катализаторе, восстановительной среды [1]. Раствор мочевины в отработавших газах дизеля подвергается воздействию процессов пиролиза и гидролиза. В присутствии катализатора, происходит восстановительная реакция, в зависимости от соотношения  $\text{NO}/\text{NO}_2$ . Начиная с экологических требований Евро-5, при проведении контрольных испытаний систем нейтрализации с подачей раствора мочевины, ограничивается выброс аммиака: Евро-5 — не более 25 мг/кг; Евро-6 — не более 10 мг/кг.

Удовлетворение таким жестким требованиям возможно исключительно на основе проведения расчетно-экспериментальной оптимизации и повышения эффективности всех элементов системы нейтрализации [2, 6, 7].

При использовании раствора мочевины в качестве реагента-восстановителя оксидов азота

нельзя исключить неполное взаимодействие образующегося при разложении мочевины аммиака с  $\text{NO}_x$  [3]. В этом случае на выходе из системы нейтрализации становится неизбежным выброс (проскок)  $\text{NH}_3$ , концентрация которого ограничена нормами ЕВРО-6. Наличие аммиака может быть следствием:

- неравномерного распределения аммиака в зоне реакции;
- общей избыточной подачи раствора мочевины (передозировка);
- избыточной скорости потока ОГ через реакционную зону;
- недостаточной температуры в зоне реакции.

Для ограничения проскока аммиака в системе применяется:

- установка на выходе восстановительного нейтрализатора участка с окислительным катализатором;
- строгое дозирование подачи мочевины в соответствии с концентрацией оксидов азота и условиями в зоне реакции.

Вместе с тем очевидно, что реализация этих мероприятий связана с дополнительными затратами и необходимостью строго контроля процесса подачи мочевины, что в свою очередь приводит к увеличению стоимости всей системы.

Поддержание точности дозирования возможно при использовании контроля по сигналам датчиков  $\text{NO}_x$  и построении правильной модели образования и распределения аммиака.

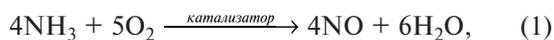
Методом контроля дозирования мочевины может быть использование для этой цели стандартного датчика  $\text{NO}_x$  с использованием известного эффекта чувствительности датчиков к содержанию аммиака.

Например, конструкция датчика измерения оксидов азота 5WK9, состоящего из двух камер.

В первой камере датчика происходит изменение концентрации кислорода до стехиометрического состояния и окисления  $\text{NO}$  до  $\text{NO}_2$ . Таким образом, поступающий во вторую камеру газ имеет определенную концентрацию кислорода и измеряемую концентрацию оксидов азота. Во второй камере происходит диссоциация оксида азота и измерение концентрации кислорода. Поскольку концентрация свободного кислорода установлена в первой камере датчика, увеличение сигнала по кислороду во второй камере показывает концентрацию оксидов азота.

Впрыскивание в отработавшие газы раствора мочевины, с последующей конвертацией в аммиак и попадание аммиака  $\text{NH}_3$  увеличивает показания датчика и регистрируемый потенциал, т. е. количество связанного в первой камере кислорода и диссоциированного во второй камере.

Некоторое количество  $\text{O}_2$  может быть связано при окислении  $\text{NH}_3$  на катализаторе (электродах) в первой камере и перенесено на  $\text{NO}_2$  во вторую камеру.



с последующим окислением  $\text{NO}$  кислородом воздуха



Однако количество окисленного аммиака зависит от нескольких параметров и может быть выражено как [4]:

$$\text{RNO}_x = \text{RCNO}_x + K \cdot \text{RCNH}_3, \quad (3)$$

где  $\text{RNO}_x$  — показания датчика мг/кг,  $\text{RCNO}_x$  — концентрация оксидов азота  $\text{NO}$ , мг/кг;  $\text{RCNH}_3$  — фактическая концентрация аммиака  $\text{NH}_3$ , мг/кг;  $K$  — коэффициент истинности показаний датчика  $\text{NO}_x$  по  $\text{NH}_3$ , отношение измеренной и фактической.

На испытательной моторной станции ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» сотрудниками центра «Энергоуста-

новки» совместно с сотрудниками ООО «НТЦ МСП» проводились экспериментальные исследования комплексной системы нейтрализации отработавших газов в составе силовой установки на базе серийного двигателя ЯМЗ 6566. Одной из целей проводимых работ была задача определения возможности сопоставления показаний датчиков  $\text{NO}_x$  и наличия аммиака, коэффициента истинности  $K$  по расчетным стехиометрическим соотношениям при известном давлении, температуре и количестве раствора мочевины.

При проведении исследований применялась измерительная аппаратура в следующем исполнении.

В число регистрируемых и уточняемых характеристик включены:

- температуры по длине выпускного тракта в ранее выбранных сечениях системы нейтрализации;
- давления в тех же участках;
- концентрации  $\text{NO}_x$  и кислорода  $\text{O}_2$ ;
- нагрузка и частота вращения коленчатого вала двигателя.

На рисунке 1 представлены измерительные сечения, в которых размещены датчики  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$ , давления и температуры.

Автоматизированная система сбора и обработки информации обеспечивает контроль испытаний двигателя с частотой до 10 Гц в моторном боксе, сбор измеренных данных с комплекта датчиков, измерение, хранение и отображение параметров, в том числе в графической форме, и распечатку результатов исследований.

Были выполнены контрольные замеры профиля температур, давлений и концентраций  $\text{NO}_x$  по длине системы нейтрализации. Результаты замеров представлены на рисунках 2–3.

Измерение профилей температур, давлений и концентраций  $\text{NO}_x$  проводились на следующих рабочих точках двигателя: диапазоне частоты вращения коленчатого вала 1250–1750 мин<sup>-1</sup> и диапазоне нагрузок от 25–100 % от номинальной.

Величины, существенно влияющие на процессы, протекающие в системе нейтрализации, — это расход ОГ и его температура. Изменение этих величин при выбранных рабочих диапазонах двигателя представлены на рисунках 2–3.

Таким образом, испытания системы нейтрализации проводились в диапазоне изменения расходов ОГ от 400 до 110 кг/ч и температур от 200 до 500 °С.

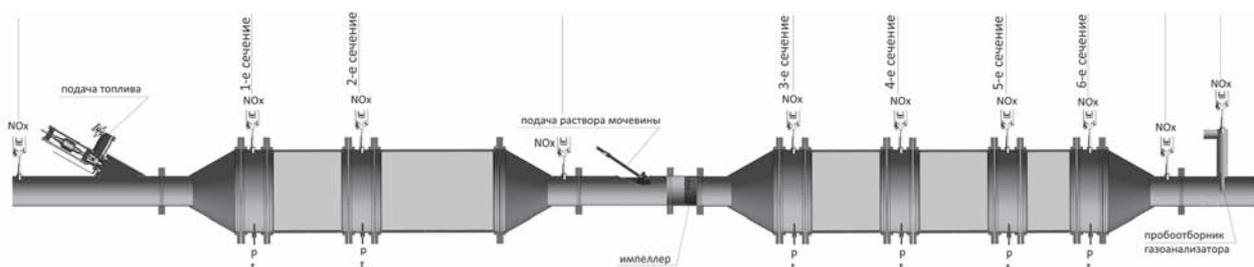


Рисунок 1 — Состав системы комплексной нейтрализации с измерительными сечениями

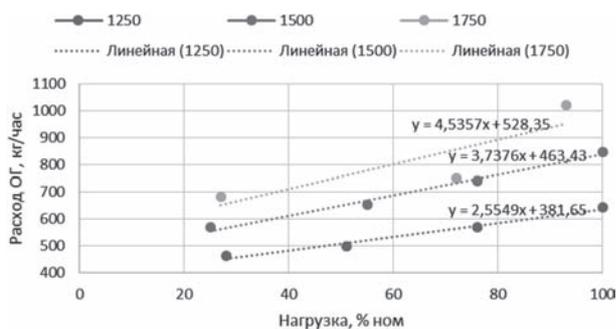


Рисунок 2 — Расход ОГ в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала

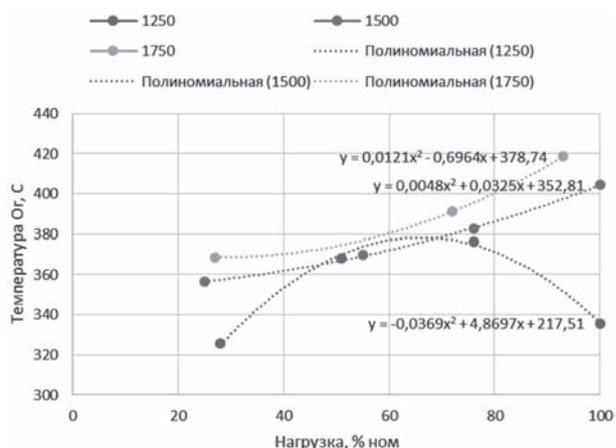


Рисунок 3 — Температура ОГ в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала

На рисунке 4 приведен типовой профиль изменений показаний датчиков оксидов азота по длине системы нейтрализации.

Полученные таким образом значения обрабатывались и анализировались.

Режимы работы двигателя и системы впрыска мочевины представлены в таблице.

На рисунке 5 приведены результаты измерения NO<sub>x</sub> в начале гидролизного участка (до форсунки) и в конце гидролизного участка (после импеллера).

В промежутках между режимами впрыск мочевины не осуществлялся.

Концентрация аммиака определялась как разница между показаниями датчика на входе в гидролизный участок до форсунки и в конце гидролизного участка после импеллера.

Концентрация аммиака рассчитывалась также исходя из фактической дозы внесенной мочевины

Таблица — Режимы работы двигателя и измеряемых параметров

Время, с	Частота вращения коленчатого вала, мин <sup>-1</sup>	Относительный момент, %	Поток ОГ, кг/час	Впрыск мочевины, мг/с	Температура ОГ, °C
35–409	1257	100	682	1053	347
511–885	1500	55	700	671	355
1021–1327	1250	29	472	273	285

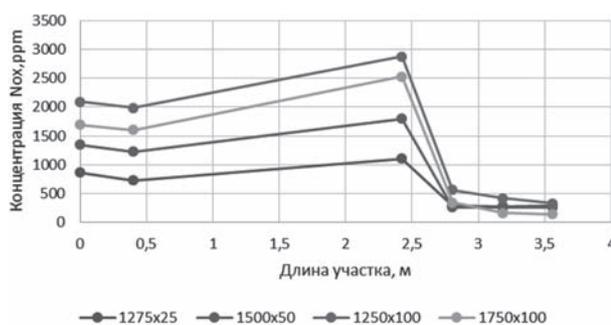


Рисунок 4 — Типовой профиль концентраций NO<sub>x</sub> по длине системы



Рисунок 5 — Значения NO<sub>x</sub> и NH<sub>3</sub> на гидролизном участке

и, соответственно, пересчитанного количества аммиака в мг/кг (ppm).

Отношение между показаниями датчика и фактической концентрацией, выраженное в процентах, считалось истинностью показаний.

На рисунке 5 показано, что измеряемый сигнал датчика NO<sub>x</sub> четко коррелирует с режимами работы системы нейтрализации, режимами работы насоса мочевины и соответственно количеством NH<sub>3</sub> в системе.

При нулевом впрыске мочевины показания датчика на выходе из гидролизного участка полностью соответствуют показаниям датчика на входе в гидролизный участок (409–511 с, 919–1021 с).

Увеличение показаний датчика пропорционально дозированию мочевины на различных режимах (1100 мг/кг — 1053 мг/с, 663 мг/кг — 671 мг/с, 321 мг/кг — 271 мг/с).

Причем, необходимо отметить отсутствие влияния аммиака NH<sub>3</sub> на показания датчика NO<sub>x</sub>, а именно, накопления ведущего к постоянному увеличению или снижению сигнала датчика при стабильном фактическом значении.

В результате проведенных работ показано, что датчик NO<sub>x</sub> реагирует на наличие аммиака в отработавших газах, его показания могут быть

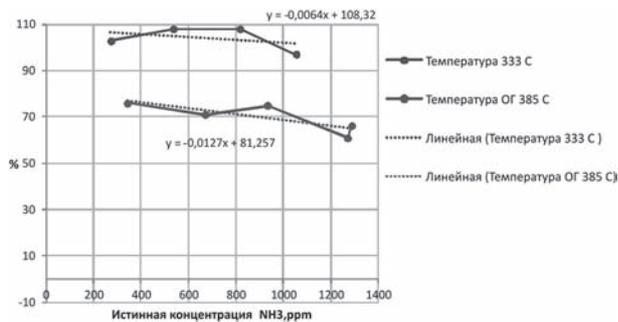


Рисунок 6 — Зависимости коэффициента  $K$  от начальной концентрации  $\text{NH}_3$

использованы для получения регулировочной характеристики.

Можно было бы предположить влияние на коэффициент истинности начальной концентрации аммиака, однако это влияние не существенно (рисунок 6).

Аналогично не удалось обнаружить влияние на коэффициент  $K$  концентрации свободного кислорода и давления.

Гораздо существенней влияние температуры, которое представлено на рисунке 7.

Выполненный комплекс испытаний позволил определить гарантированные допуски дозирования для исключения превышения допустимой концентрации [5].

По результатам проведенных исследований установлено, что показания датчика  $\text{NO}_x$  с учетом влияния  $\text{NH}_3$  можно оценить по выражению:

$$RNO_x = RCNO_x + (-0,0731 \cdot T + 104,13) \times RCNH_3, \quad (4)$$

где  $T$  — температура отработавших газов.

Полученные результаты позволяют уточнить алгоритм дозирования раствора мочевины на всех режимах испытательного цикла для обеспечения выполнения требований по ограничению проскока аммиака. Использование этого алгоритма в системе управления подачей раствора мочевины позволит упростить состав системы и исключить из состава

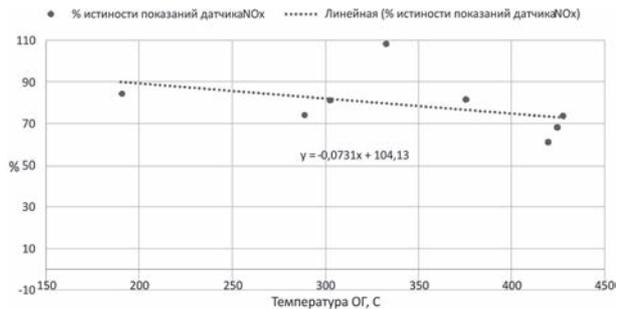


Рисунок 7 — Влияние температуры на измерения концентрации  $\text{NH}_3$

дополнительный окислительный катализатор (так называемый АМОХ — катализатор) и использовать сигналы датчика в системах бортовой диагностики.

### Список литературы

1. Carslawa, David C. New insights from comprehensive on-road measurements of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{NH}_3$  from vehicle emission remote sensing in London, UK / David C. Carslawa, Glyn Rhys-Tyler // Atmospheric Environment. — 2013. — 81. — Pp. 339–347.
2. Галевко, В.В. Определение параметров диссипативных и каталитических элементов систем обработки отработавших газов, необходимых для их проектирования методом конечно-элементного моделирования / В.В. Галевко, Г.Г. Надарейшвили, С.И. Юдин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2013. — № 2(24).
3. Closed-loop control of a SCR system using a  $\text{NO}_x$  sensor cross-sensitive to  $\text{NH}_3$  / A. Bonfils [et al.] // Preprints of the 8th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes The International Federation of Automatic Control Furama Riverfront, Singapore, July 10–13, 2012.
4. Schär, C.M. Control of an SCR Catalytic Converter System for a Mobile Heavy-Duty Application / C.M. Schär, C.H. Onder, H.P. Geering // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2006. — Vol. 14, No. 4. — Pp. 641–653.
5. Schmitt, J. Control of an Industrial SCR Catalyst Using Ceramic  $\text{NO}_x$  Sensors / Joshua Schmitt, B. Daniel // Olsen Energy and Power Engineering. — 2011. — 3. — Pp. 317–324.
6. Бахмутов, С.В. «Чистые» автомобили: направления реализации и достигаемые результаты / С.В. Бахмутов, К.Е. Карпунин // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 6(77). — С. 51–54.
7. Звонов, В.А. Оценка жизненного цикла, основа совершенствования АТС / В.А. Звонов, А.В. Козлов, А.С. Теренченко // Автомобил. пром-сть. — 2003. — № 11. — С. 9.

DEMIDOV Alexey A., Cand. Techn. Sc.  
Project Director “Diesel Engine” SSC<sup>1</sup>

NADAREYSHVILI Givi G., Cand. Techn. Sc.  
Head of the Department “Antitoxic and Noise Reduction Systems” SSC<sup>1</sup>  
E-mail: givi.nadareyshvili@nami.ru  
<sup>1</sup>FSUE “NAMI”, Moscow, Russia

TITCHENKO Andrey Yu.  
General Director  
LLC “NTC MSP”, Moscow, Russia

Received 17 April 2015.

## AMMONIA CONCENTRATION CONTROL IN SELECTIVE REDUCTION SYSTEMS OF NITROGEN OXIDES OF DIESELS

*Reduction of toxic components in the exhaust gas of diesel engines to the level of the requirements of Euro 6 is a socially important and technically complex problem. The problem of optimal dosing of the urea solution and release free ammonia exception beyond neutralization system is very important when designing a system for selective catalytic reduction of nitrogen oxides of the diesel engine. In this study, the analysis of the test results of complex system of neutralization of the diesel engine and evaluated the possibility of measuring free ammonia nitrogen oxide sensors. Obtained by the sensor correlation of nitric oxide in presence of free ammonia with the influence of temperature. Implementing the results for the system controlling the supply of urea will simplify the structure of the system, exclude the additional oxidation catalyst (AMOX — catalyst) and make possible to use the sensor signals in the OBD.*

**Keywords:** diesel engine, exhaust, nitrogen oxides, neutralization system, urea, ammonia, hydrolysis, pyrolysis, oxidation, reduction, the catalyst

### References

1. Carslaw D.C., Rhys-Tyler G. New insights from comprehensive on-road measurements of NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> from vehicle emission remote sensing in London, UK. *Atmospheric Environment*, 2013, no. 81, pp. 339–347.
2. Galevko V.V., Nadarejshvili G.G., Judin S.I. Opredelenie parametrov dissipativnyh i kataliticheskikh jelementov sistem obrabotki otrabotavshih gazov, neobhodimyh dlja ih proektirovanija metodom konechno-jelementnogo modelirovanija [Defining the parameters of dissipative and catalytic elements of exhaust gas treatment systems required for their design by finite element modeling]. *Vektor nauki Tol'jatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of the Science of the Togliatti State University], 2013, no. 2(24).
3. Bonfils A. [et al.]. Closed-loop control of a SCR system using a NO<sub>x</sub> sensor cross-sensitive to NH<sub>3</sub>. *Preprints of the 8th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes The International Federation of Automatic Control Furama Riverfront*, Singapore, July 10–13, 2012.
4. Schär C.M., Onder C.H., Geering H.P. Control of an SCR Catalytic Converter System for a Mobile Heavy-Duty Application. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, vol. 14, no. 4, pp. 641–653.
5. Schmitt J., Daniel B. Control of an Industrial SCR Catalyst Using Ceramic NO<sub>x</sub> Sensors. *Olsen Energy and Power Engineering*, 2011, no. 3, pp. 317–324.
6. Bahmutov S.V., Karpuhin K.E. “Chistye” avtomobili: napravlenija realizacii i dostigaemye rezul'taty [“Clean” cars: directions of implementation and achieved results]. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov* [Journal of automotive engineers], 2012, no. 6(77), pp. 51–54.
7. Zvonov V.A., Kozlov A.V., Terenchenko A.S. Ocenka zhiznennogo cikla, osnova sovershenstvovanija ATS [Life cycle assessment, basis of ATS updating]. *Avtomobil. prom-sr'* [Automotive industry], 2003, no. 11, p. 9.