

## СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ АВТОТРАНСПОРТА СИСТЕМОЙ СЕЛЕКТИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ (SCR)

**Р.А. Кораблев, В.П. Белокуров, А.Д. Голев,  
М.В. Кочергина, В.В. Стасюк, Э.Н. Бусарин**

*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
г. Воронеж, Россия*

**Аннотация:** В статье рассмотрен метод снижения выбросов, вызванных автотранспортом, в ходе химических реакций в потоке выхлопных газов с использованием каталитических конвертеров после образования токсичных выбросов системой селективного каталитического восстановления (SCR).

**Ключевые слова:** загрязняющие вещества, выхлопные газы, двигатель внутреннего сгорания, автотранспорт, система селективного каталитического восстановления

## REDUCTION OF POLLUTANT EMISSIONS FROM MOTOR VEHICLES USING SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION (SCR) SYSTEM

**R.A. Korablev, V.P. Belokurov, A.D. Golev,  
M.V. Kochergina, V.V. Stasyuk, E.N. Busarin**

*Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

**Abstract:** This article explores a method for reducing emissions caused by motor vehicles during chemical reactions in the exhaust gas stream using catalytic converters after the formation of toxic emissions with the selective catalytic reduction (SCR) system.

**Keywords:** pollutants, exhaust gases, internal combustion engine, motor vehicles, selective catalytic reduction system

Выбросы выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания, являются одним из наиболее опасных факторов для окружающей среды и здоровья населения. С увеличением числа автомобилей в мире выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух становятся глобальной проблемой. Снижение контроля над выбросами ЗВ в атмосферу может привести к невозможности обитания на планете.

В этой связи постоянное ужесточение стандартов на выбросы автотранспорта стимулирует исследователей и производителей двигателей разрабатывать системы, позволяющие снизить количество выбросов ЗВ. В данной работе описываются основные загрязняющие вещества в выхлопных газах ДВС, и изучаются методы их снижения на основе детального обзора литературы. Исследованы современные и технологичные системы, используемые для снижения выбросов, связанных с автотранспортом.

Метод снижения выбросов, вызванных автотранспортом, предполагает химические реакции в потоке выхлопных газов с использованием каталитических конвертеров после образования токсичных выбросов. Эти химические реакции преобразуют вредные выхлопные газы в нетоксичные  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  [1, 2].

Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  после введения стандарта Евро-4 стало значительно сложнее обеспечивать только за счет изменений в технологии двигателя. Вступлением в силу стандартов Евро-5 и Евро-6 в 2009 и 2014 годах в ЕС выбросы  $\text{NO}_x$  уменьшатся на 60 %, а выбросы частиц - на 80 % [1, 3]. Это подчеркивает необходимость дальнейшего снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в выпускной системе ДВС. Селективный каталитический восстановитель (SCR) исследуется уже давно как метод снижения выбросов  $\text{NO}_x$  [4].

SCR достигает взаимодействия  $\text{NO}_x$  с металлическим катализатором путем впрыскивания аммиака или мочевины на катализатор. Кроме того, также можно впрыскивать  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  в выхлопные газы, чтобы обеспечить образование безвредного водяного пара и азота. Снижение выбросов может достигать высокой эффективности (до 90 %). Однако из-за стоимости, сложности внедрения и операционного контроля на данный момент этот метод применяется только на большегрузных транспортных средствах [5]. Наиболее эффективным катализатором в SCR для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  является  $\text{Ag-Al}_2\text{O}_3$ . SCR система на бензиновых автомобилях считается недостаточно применимой, так как считается слишком дорогой и из-за того, что средние температуры выпуска для таких автомобилей довольно низкие. Вместо SCR систем в легковых автомобилях более подходящим выбором является использование  $\text{NO}_x$  хранилища [6]. Однако продолжают исследования по снижению размеров и стоимости SCR системы, чтобы она стала

более доступной для легковых автомобилей. На рисунке 1 показана система SCR. В этой системе отработавший газ смешивается с аммиаком, проходит через катализатор при температуре 300-400 °С, в результате чего NO<sub>x</sub> превращается в N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O [7].

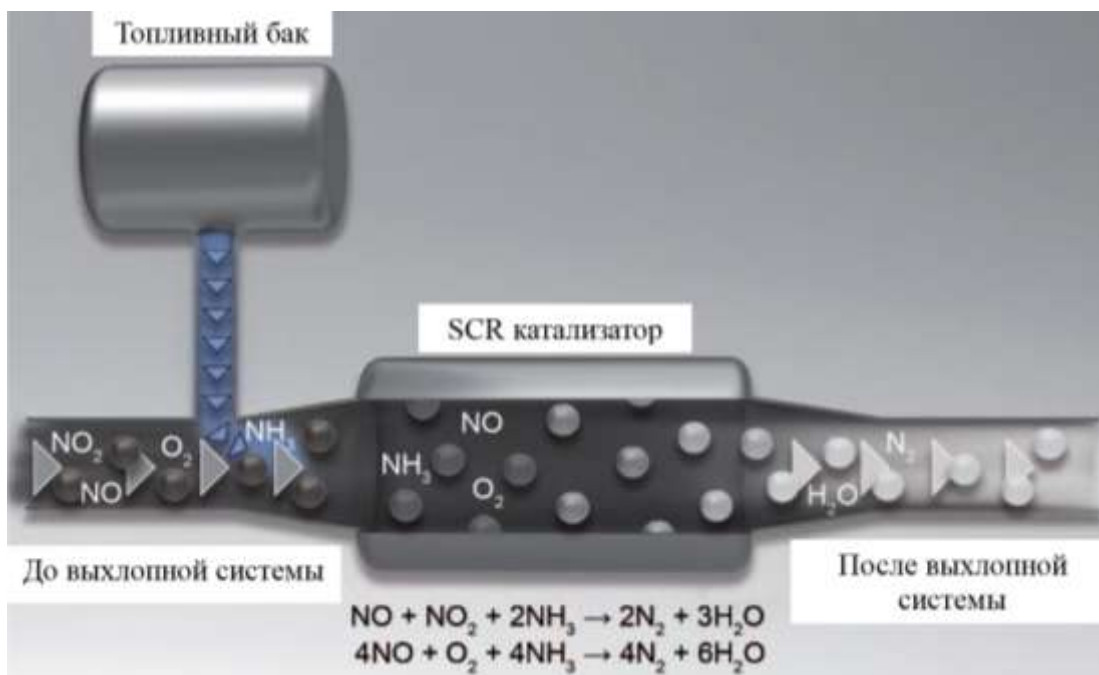


Рисунок 1 – Схема системы SCR [8]

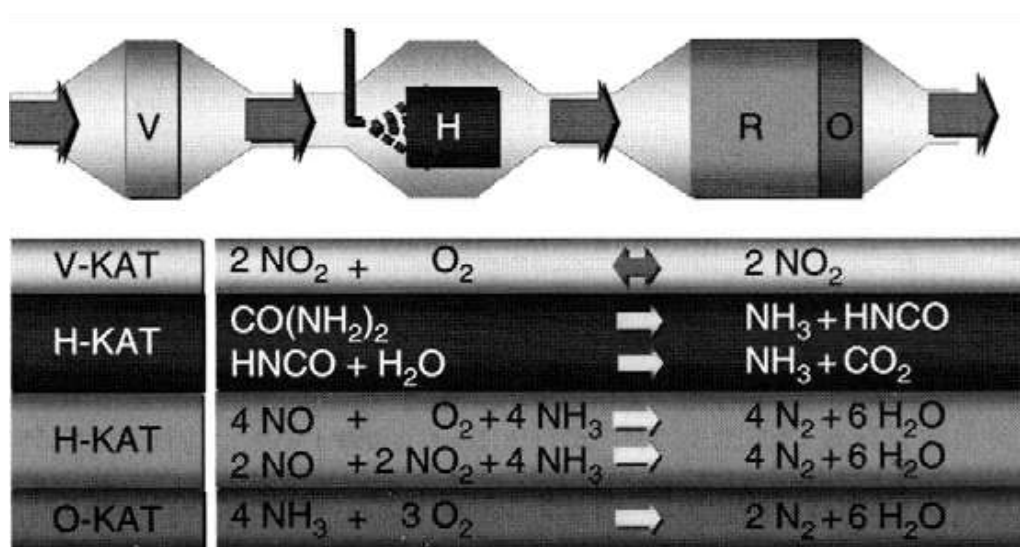


Рисунок 2 – Схема системы MAN VHO

Система VHO, являющаяся одной из наиболее сложных систем в применении SCR, была разработана компанией MAN [9]. На рисунке 2 изображена схема системы MAN VHO. Система с названием VHO включает в себя не только SCR, но также каталитический окислитель аммиака [10]. В результате смешивания выхлопных газов с NH<sub>3</sub> происходят реакции, указанные в уравнениях (1) и (2).



Катализатор окисления аммиака активируется при температуре ниже 250°C, и с увеличением температуры его окислительная способность возрастает, преобразуя NO и N<sub>2</sub>O, происходящие из SCR-катализатора, в H<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub>. Эффективность SCR напрямую зависит от количества аммиака, подаваемого в окислительный катализатор. Если количество аммиака недостаточно, конверсия NO<sub>x</sub> будет недостаточной. С другой стороны, избыточное количество аммиака приведет к выбросу аммиака в атмосферу. На рисунке 3 показана зависимость между соотношением NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>, конверсией NO<sub>x</sub> и температурой.

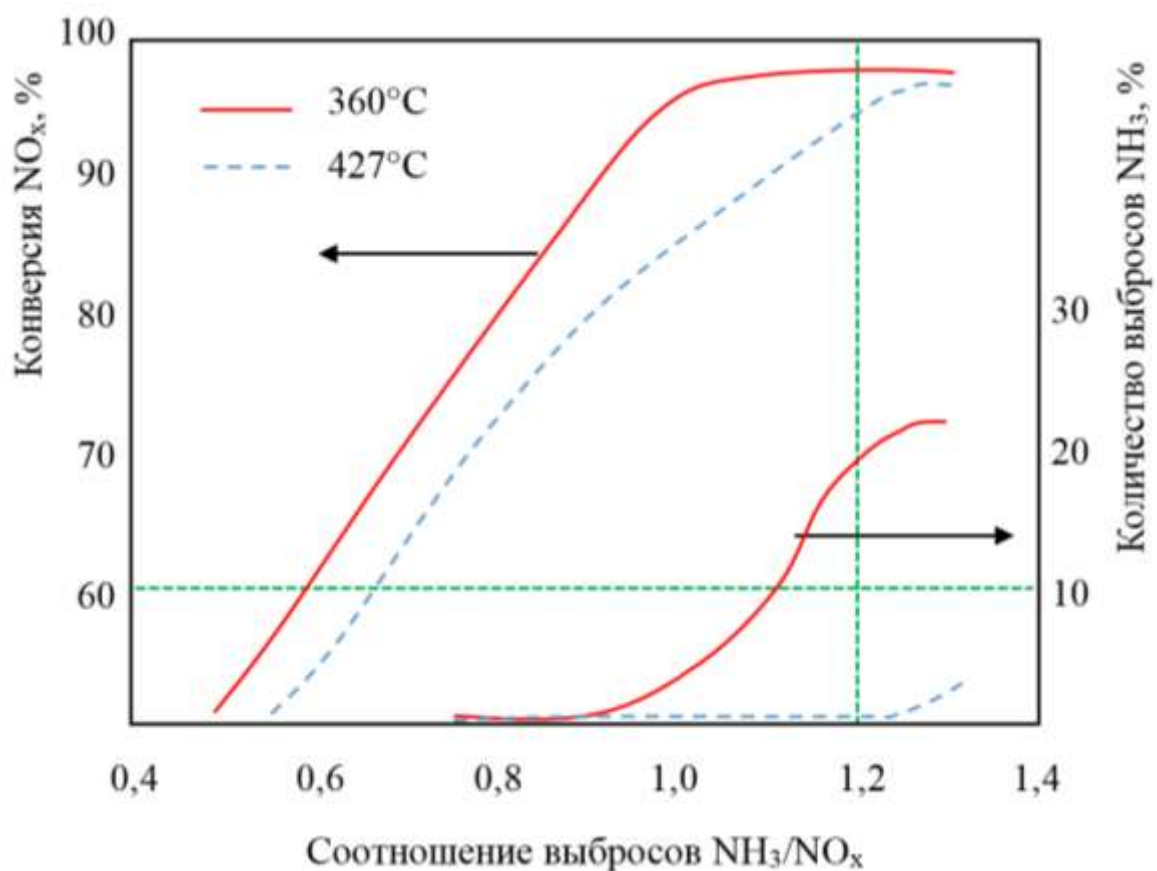


Рисунок 3 – Зависимость конверсии NO<sub>x</sub> от соотношения NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>

Повышение соотношения NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> приводит к увеличению конверсии NO<sub>x</sub>. Однако при увеличении рабочей температуры конверсия снижается. Тем не менее увеличение температуры уменьшает количество несожженного NH<sub>3</sub> [9, 11].

В большинстве случаев жидкие и твердые частицы, выбрасываемые из выхлопных газов дизельных двигателей, создают еще один вид вредных выбросов

вдоль всего выхлопа. Дизельные фильтры для частиц пропускают эти мелкие частицы через параллельные сжатые каналы. Эти частицы, проходящие через структуру, подобную кордьериту, удерживаются в фильтре [12]. Одноразовый фильтр для частиц, используемый для уменьшения количества частиц, показан на рисунке 4.

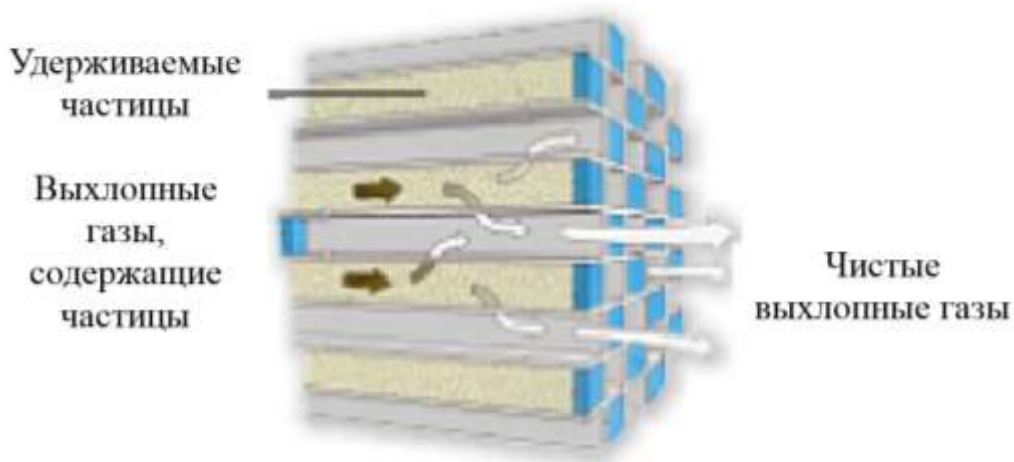


Рисунок 4 – Однокамерный сажевый фильтр

Элементы, удерживаемые в сажевом фильтре, очищаются методом регенерации, при котором они подвергаются сжиганию. Этот тип фильтров состоит из металлических катализаторов. Эти фильтры, состоящие из двух камер, обеспечивают окисление NO в  $\text{NO}_2$ , окисление CH и CO-выбросов в  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , что является важной частью процесса. Во второй камере частицы, содержащиеся в выбросах, удерживаются на стенах фильтра.  $\text{NO}_2$ , образующийся в первой камере в результате реакции, используется для сжигания удерживаемых частиц. На рисунке 5 показаны однокамерный сажевый фильтр и различные сажевые фильтры.

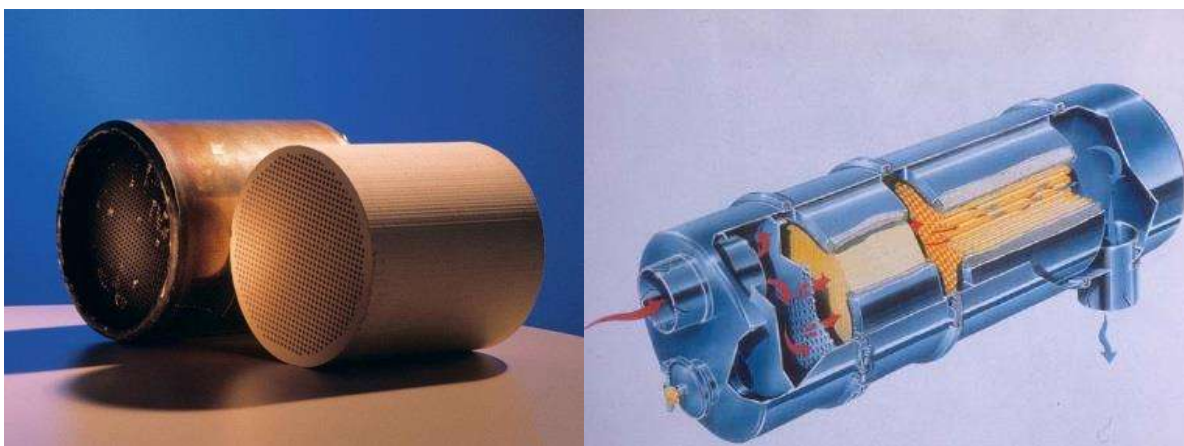


Рисунок 5 – Дизельный сажевый фильтр с двумя камерами

Из-за структуры сажевого фильтра твердые и жидкие частицы приводят к его засорению и снижению производительности. В системе регенерации с дополнительным поджиганием, разработанной Deutz, выхлопные газы достигают температуры, необходимой для регенерации, с помощью окисления. Сгорание накапливающихся частиц позволяет избежать засорения фильтра и улучшает его фильтрационные свойства. Основными компонентами системы являются керамическая структура, смесительная камера и поджигатель [10].

Кроме того, усовершенствование дизайна камеры сгорания и впускного коллектора, модификации топливной и системы зажигания внутреннего сгорания, а также внедрение различных решений, таких как активный угольный фильтр и положительная вентиляция картера, снижают вредные выбросы в окружающую среду, происходящие от топлива и масляных паров. Дополнительно, находящийся в выхлопной системе режим холостого хода снижает и фиксирует холостой ход. Особенно в случае нулевой нагрузки на двигателе, дополнительно подается воздух для окисления подаваемого в цилиндр топлива и помогает снизить выбросы углеводородов. Модуль управления двигателем непрерывно контролирует состав смеси с помощью лямбда-зонда в выхлопной системе, обеспечивая оптимальное соотношение воздуха и топлива для работы двигателя [13, 14].

#### Список литературы

1. Европейская нормативная база и выбросы твердых частиц бензиновыми автомобилями малой грузоподъемности: обзор / Б. Гичаскиел, А. Джоши, Л. Нциахристос, П. Дилара // Катализаторы. – 2019. – 9 (7). – 586. – DOI 10.3390/catal9070586.

2. Повышение пассивной безопасности транспортных средств за счет температурного расчета тормозных узлов / В. П. Белокуров, Р. А. Кораблев, Е. Н. Бусарин [и др.] // Достижения инженерных исследований: Материалы Международной конференции "Авиамеханика и транспорт" (AVENT 2018), Иркутск, 21-26.05.2018 год. – Иркутск: Атлантис Пресс, 2018. – с. 62-66. – DOI 10.2991/avent-18.2018.12.

3. Определение коэффициентов выбросов легковых автомобилей, работающих на сжиженном газе стандарта Евро-6, с помощью лабораторных и дорожных испытаний: влияние на общенациональную оценку выбросов для Италии / Т. Беллин, С. Касадеи, Т. Росси [и др.] // Атмосферная среда: Х. - 2022. – Том 10. – 100186. – DOI 10.1016/j.aea.2022.100186.

4. Инновационные катализаторы для селективного каталитического восстановления NOx с помощью H<sub>2</sub>: Систематический обзор / С.М. Фархан, У. Пан,



С. Чжицзянь, Ю. Цзяньцзюнь // Топливо. – 2024. – Том 355. – 129364. – DOI 10.1016/j.fuel.2023.129364.

5. Ли К. Система HC-SCR, сочетающая катализаторы Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со стойкостью к гидротермальному старению для одновременного удаления NO, HC и CO / К. Ли, Б. Чой // Журнал промышленной и инженерной химии. – 2021. – Том 102. – стр. 51-68. – DOI 10.1016/j.jiec.2021.06.030.

6. Виньеш Р. Критический интерпретационный обзор текущего состояния и перспектив системы селективного каталитического восстановления для стратегии удаления NO<sub>x</sub> в двигателях с воспламенением от сжатия / Р. Виньеш, Б. Ашок // Топливо. – 2020. – Том 276. – 117996. – DOI 10.1016/j.fuel.2020.117996

7. Современная каталитическая технология селективного каталитического восстановления (SCR) для удаления NO<sub>x</sub> в Южной Корее / Х.-С. Ким, С. Касипанди, Дж. Ким [и др.] // Катализаторы. – 2020. – 10 (1). – 52. – DOI 10.3390/catal10010052.

8. Наполитано П. Понимание технологии селективного каталитического восстановления для контроля окислов азота в судовых двигателях / П. Наполитано, Л.Ф. Лиотта, К. Гвидо // Катализаторы. – 2022. – 12 (10). – 1191. – DOI 10.3390/catal12101191.

9. Активные оксиды WO<sub>3</sub>–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> для удаления NO<sub>x</sub> с помощью NH<sub>3</sub>: методы получения, состав катализаторов и механизм дезактивации - Обзор / У. Чжан, С. Ци, Г. Панталео, Л.Ф. Лиотта // Катализаторы. – 2019. – 9 (6). – 527. – DOI 10.3390/catal9060527.

10. Прогресс катализаторов селективного каталитического восстановления денитрификации при широкой температуре в нейтрализации углерода / Д. Линь, Л. Чжан, Ю. Хан [и др.] // Front Chem. – 2022. – 10. – 946133. – DOI 10.3389/fchem.2022.946133.

11. Влияние соотношения компонентов смеси аммиака на характеристики горения и выбросы NO<sub>x</sub> при совместном сжигании шлама и угля в коммунальном котле / Д. Вэй, З. Чжан, Л. Ву [и др.] // Энергетика. – 2023. – Том 283. – 129220. – DOI 10.1016/j.energy.2023.129220.

12. Обзор сажевых фильтров для двигателей внутреннего сгорания / Р. Донг, З. Чжан, Ю. Йе [и др.] // Процессы. – 2022. – 10 (5). – 993. – DOI 10.3390/pr10050993

13. Рагон П.-Л. Оценочная стоимость технологии контроля выбросов дизельного топлива для соответствия будущим стандартам Euro VII / П.-Л. Рагон, Ф. Родригес // Технический отчет. – 2021. – 20. – URL: <https://theicct.org/publications/cost-diesel-emissions-control-euro-vii-apr2021> (Дата обращения: 8 декабря 2023 года). - Текст: электронный.

14. Химинис Дж. На пути к соблюдению предполагаемого лимита выбросов NO<sub>x</sub> в соответствии с ЕВРО VII с использованием термоэлектрического нагревателя для последующей обработки / Дж. Химинис, А. Массажер, Э. Массажер // Тематические исследования в теплотехнике. – 2022. – Том 36. – 102182. – DOI 10.1016/j.csite.2022.102182.

#### References

1. European regulatory framework and particulate matter emissions of gasoline light-duty vehicles: a review / B. Giechaskiel, A. Joshi, L. Ntziachristos, P. Dilara // Catalysts. – 2019. – 9 (7). – 586. – DOI [10.3390/catal9070586](https://doi.org/10.3390/catal9070586).

2. Increase of passive safety of vehicles due to temperature calculation of brake units / V. P. Belokurov, R. A. Korablev, E. N. Busarin [et al.] // Advances in Engineering

Research : Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018), Irkutsk, 21–26.05.2018. – Irkutsk: Atlantis Press, 2018. – pp. 62-66. – DOI [10.2991/avent-18.2018.12](https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.12).

3. Determination of Euro 6 LPG passenger car emission factors through laboratory and on-road tests: Effect on nation-wide emissions assessment for Italy / T. Bellin, S. Casadei, T. Rossi [et al.] // Atmospheric Environment: X. – 2022. – Vol. 10. – 100186. – DOI [10.1016/j.aeaoa.2022.100186](https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100186).

4. Innovative catalysts for the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with H<sub>2</sub>: A systematic review / S.M. Farhan, W. Pan, C. Zhijian, Y. JianJun // Fuel. – 2024. – Vol. 355. – 129364. – DOI [10.1016/j.fuel.2023.129364](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129364).

5. Lee K. HC-SCR system combining Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts with resistance to hydrothermal aging for simultaneous removal of NO, HC, and CO / K. Lee, B. Choi // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2021. – Vol. 102. – pp. 51-68. – DOI [10.1016/j.jiec.2021.06.030](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.06.030).

6. Vignesh R. Critical interpretative review on current outlook and prospects of selective catalytic reduction system for De-NO<sub>x</sub> strategy in compression ignition engine / R. Vignesh, B. Ashok // Fuel. – 2020. – Vol. 276. – 117996. – DOI [10.1016/j.fuel.2020.117996](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117996).

7. Current catalyst technology of selective catalytic reduction (SCR) for NO<sub>x</sub> removal in South Korea / H.-S. Kim, S. Kasipandi, J. Kim [et al.] // Catalysts. – 2020. – 10 (1). – 52. – DOI [10.3390/catal10010052](https://doi.org/10.3390/catal10010052).

8. Napolitano P. Insights of selective catalytic reduction technology for nitrogen oxides control in marine engine applications / P. Napolitano, L.F. Liotta, C. Guido // Catalysts. – 2022. – 12 (10). – 1191. – DOI [10.3390/catal12101191](https://doi.org/10.3390/catal12101191).

9. WO<sub>3</sub>–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> active oxides for NO<sub>x</sub> SCR by NH<sub>3</sub>: preparation methods, catalysts' composition, and deactivation mechanism - A review / W. Zhang, S. Qi, G. Pantaleo, L.F. Liotta // Catalysts. – 2019. – 9 (6). – 527. – DOI [10.3390/catal9060527](https://doi.org/10.3390/catal9060527).

10. Progress of selective catalytic reduction denitrification catalysts at wide temperature in carbon neutralization / D. Lin, L. Zhang, Y. Han [et al.] // Front Chem. – 2022. – 10. – 946133. – DOI [10.3389/fchem.2022.946133](https://doi.org/10.3389/fchem.2022.946133).

11. Ammonia blend ratio impact on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions during co-firing with sludge and coal in a utility boiler / D. Wei, Z. Zhang, L. Wu, [et al.] // Energy. – 2023. – Vol. 283. – 129220. – DOI [10.1016/j.energy.2023.129220](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129220).

12. Review of particle filters for internal combustion engines / R. Dong, Z. Zhang, Y. Ye [et al.] // Processes. – 2022. – 10 (5). – 993. – DOI [10.3390/pr10050993](https://doi.org/10.3390/pr10050993).

13. Ragon P.-L. Estimated cost of diesel emissions control technology to meet future Euro VII standards / P.-L. Ragon, F. Rodriguez // Technical Report. – 2021. – 20. – URL: <https://theicct.org/publications/cost-diesel-emissions-control-euro-vii-apr2021> (Accessed: December 8, 2023). - Text: electronic.

14. Ximinis J. Towards compliance with the prospective EURO VII NO<sub>x</sub> emissions limit using a thermoelectric aftertreatment heater / J. Ximinis, A. Massaguer, E. Massaguer // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 36. – 102182. – DOI [10.1016/j.csite.2022.102182](https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102182).