

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106160>

Оригинальное исследование



# Результаты применения пористых проницаемых СВС-каталитических блоков в многоступенчатых нейтрализаторах отработавших газов дизелей

А.А. Мельберт<sup>1</sup>, Ч.Х. Нгуен<sup>1</sup>, А.В. Машенский<sup>1</sup>, В.А. Соколова<sup>2</sup><sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия<sup>2</sup> Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** По заявлениям ведущих специалистов дизелестроения для выполнения вводимых норм на уровни вредных выбросов в атмосферу необходимо применение фильтров твердых частиц и каталитических нейтрализаторов, которые позволят повысить эффективность конверсии отработавших газов и улучшить экологические показатели дизельных двигателей.

**Цель.** Сокращение вредных выбросов в атмосферу, улучшение качества и снижение стоимости очистки отработавших газов при реализации жизненных циклов объектов транспортной энергетики путем применения пористых СВС-блоков в каталитических нейтрализаторах и сажевых фильтрах.

**Материалы и методы.** Были проведены стендовые испытания опытных образцов нейтрализаторов конструкции АлтГТУ с одной, двумя и тремя ступенями очистки. Первая ступень – сажевый фильтр из пористого проницаемого СВС-материала, вторая ступень – окислительный СВС-блок, третья ступень – каталитический восстановительный СВС-блок.

Для получения каталитических блоков методом СВС был использован следующий состав шихты: железная окалина 18Х2Н4МА – 47,5%; оксид хрома ПХ-1 по ТУ 882-76 – 17,7%; порошок никеля ПНК-ОТ-1 по ГОСТ 9722-79 – 4,9%; порошок алюминия по ТУ 485-22-87 марки АСД – 1–15%, медь – 11%; оксид алюминия – 3,8%; иридий – 0,01%. В состав шихты восстановительного блока входило 14,5% меди. Полученные блоки имели проницаемую структуру и высокую прочность. Средний размер пор составил 180 мкм. Нейтрализаторы устанавливались встык с турбокомпрессором.

**Результаты.** Выявлено, что выбросы NO<sub>x</sub> по нагрузочной характеристике дизеля КамАЗ-740 при 2600 мин<sup>-1</sup> уменьшаются при средних эффективных давлениях  $P_e$ , равных 0,03; 0,55; 0,77 МПа с 3,82...11,62...9,49 г/м<sup>3</sup> соответственно до 3,23...6,52...4,61 г/м<sup>3</sup> или примерно на 13...44...53%. Уменьшение выбросов твердых частиц при тех же нагрузках составило 75; 45; 63%, углеводородов – 72; 53; 54%. Минимальный удельный расход топлива наблюдался в интервале 1600...2000 мин<sup>-1</sup> по внешней скоростной характеристике. При использовании нейтрализатора с двумя, установленными последовательно каталитическими блоками, выбросы с ОГ углеводородов уменьшились с 3,12...1,21 до 0,90...0,29 г/м<sup>3</sup>, или на 71...76%. Степень конверсии CO, составила 78...73 %; NO<sub>x</sub> – 4...52 %, а суммарный коэффициент очистки составил 0,58.

Коаксиальная установка дополнительных блоков из СВС-каталитических материалов привела к улучшению качества очистки до 0,698. За 360 часов работы эффективность конверсии ТЧ уменьшилась с 55 до 45%, CO – с 58 до 46%, NO<sub>x</sub> – с 65 до 44%, что свидетельствовало о начале дезактивации катализаторов.

**Заключение.** Использование многоступенчатых нейтрализаторов с СВС-каталитическими блоками позволяет уменьшить выбросы углеводородов в 1,95 раза, оксида углерода в 3,6 раза, оксидов азота в 2 раза, твердых частиц в 3 раза, обеспечивая выполнение стандартов России.

**Ключевые слова:** дизель; отработавшие газы; нейтрализатор; каталитический пористый блок; конверсия; самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

## Для цитирования:

Мельберт А.А., Нгуен Ч.Х., Машенский А.В., Соколова В.А. Результаты применения пористых проницаемых СВС-каталитических блоков в многоступенчатых нейтрализаторах отработавших газов дизелей // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 201–208. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106160>

Рукопись получена: 11.04.2022

Рукопись одобрена: 05.08.2022

Опубликована: 15.10.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106160>

Original Study Article

# Results of the use of porous permeable SHS catalytic blocks in multistage converters, diesel exhaust gases

Alla A. Melbert<sup>1</sup>, Tran Hung Nguyen<sup>1</sup>, Alexander V. Mashensky<sup>1</sup>, Viktoria A. Sokolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

<sup>2</sup> Military Telecommunication Academy named after the Soviet Union Marshal Budienny S. M., Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** According to the statements of leading experts in the diesel industry, in order to introduce standards for the levels of harmful emissions into the atmosphere, it is necessary to use particulate filters and catalytic converters, which will increase the efficiency of exhaust gas conversion and improve the environmental performance of diesel engines.

**AIMS:** Educating harmful emissions into the atmosphere, improving the quality and reducing the cost of cleaning exhaust gases during the implementation of the life cycles of transport energy facilities by using porous SHS blocks in catalytic converters and particulate filters.

**METHODS:** Stand tests of prototypes of neutralizers of the AltSTU design with one, two and three stages of purification were carried out. The first stage is a particulate filter made of porous permeable SHS material, the second stage is an oxidizing SHS block, the third stage is a catalytic reducing SHS block. To obtain catalytic blocks by the SHS method, the following charge composition was used: iron scale 18X2H4MA -47.5%; chromium oxide PH-1 according to TU 882-76 – 17.7%; nickel powder PNK-OT-1 according to GOST 9722-79 – 4.9%; aluminum powder according to TU 485-22-87 grade ASD-1 – 15%, copper – 11%; aluminum oxide – 3.8%; iridium – 0.01%. The charge of the recovery unit consisted of 14.5% copper. The resulting blocks had a permeable structure and high strength. The average pore size was 180 microns. Neutralizers were installed butt-to-butt with a turbocharger.

**RESULTS:** It was revealed that NO<sub>x</sub> emissions according to the load characteristic of the KamAZ-740 diesel engine at 2600 min<sup>-1</sup> decrease at average effective pressures  $P_e$  equal to 0.03; 0.55; 0.77 MPa from 3.82...11.62...9.49 g/m<sup>3</sup>, respectively, to 3.23...6.52...4.61 g/m<sup>3</sup> or approximately 13...44...53%. Reduction of emissions of solid particles at the same loads was 75; 45; 63%, of hydrocarbons – 72; 53; 54%. The minimum specific fuel consumption was observed in the range of 1600...2000 min<sup>-1</sup> according to the external speed characteristic. When using a neutralizer with two catalytic units installed in series, emissions from hydrocarbon exhaust decreased from 3.12...1.21 to 0.90...0.29 g/m<sup>3</sup>, or by 71...76%. The degree of CO conversion was 78...73%; NO<sub>x</sub> – 4...52% and the total purification coefficient was 0,58.

The coaxial installation of additional blocks made of SHS-catalytic materials has led to an improvement in the quality of cleaning up to 0,698. Over 360 hours of operation, the efficiency of PM conversion decreased from 55 to 45%, CO – from 58 to 46%, NO<sub>x</sub> – from 65 to 44%, which indicated the beginning of deactivation of catalysts.

**CONCLUSIONS:** The use of multi-stage neutralizers with SHS-catalytic units can reduce emissions of hydrocarbons by 1.95 times, carbon monoxide by 3.6 times, nitrogen oxides by 2 times, solid particles by 3 times, ensuring compliance with Russian standards.

**Keywords:** diesel; exhaust gases; neutralizer; catalytic porous block; conversion; self-propagating high-temperature synthesis.

## Cite as:

Melbert AA, Nguyen TrH, Mashensky AV, Sokolova VA. Results of the use of porous permeable SHS catalytic blocks in multistage converters, diesel exhaust gases. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2022;16(3):201–208. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106160>

Received: 11.04.2022

Accepted: 05.08.2022

Published: 15.10.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической безопасности автотракторной техники является одной из основных проблем, решаемых в настоящее время мировым сообществом. Это объясняется огромным ростом количества мобильной техники, использующей в качестве окислителя топлива кислород воздуха и загрязняющей отработавшими газами окружающую среду. В свою очередь, загрязнение окружающей среды вызывает целый ряд необратимых последствий, в том числе, связанных с потеплением климата, выпадением кислотных осадков, ухудшением климатических условий и т.д.

В связи с глобальностью и актуальностью проблемы, разработка и совершенствование нормативных требований к выбросам поршневых двигателей, ведется как по национальным, так и по международным программам ООН. В Российской Федерации, согласно отраслевым и государственным стандартам, регламентируются выбросы оксида углерода (CO), углеводородов суммарно (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), оксидов азота (NO<sub>x</sub>), твердых частиц (ТЧ) и дымность. Европейской экономической комиссией ООН последовательно были введены нормы выбросов ЕЭК ООН ЕВРО-1, ЕВРО-2, ЕВРО-3, ЕВРО-4, ЕВРО-5, ЕВРО-6 [1, 2, 3].

Для судовых дизелей (главных и вспомогательных) существуют нормы вредных выбросов, установленные морским и речным транспортом. Для дизелей, используемых при разработке месторождений, существуют нормы, установленные Ростехнадзором для условий эксплуатации в условиях очистки и 0,08% после устройств очистки; по NO<sub>x</sub> – 0,07% до устройств очистки и 0,001% после устройств очистки по объему.

По заявлениям ведущих специалистов дизелестроения, автомобиле- и тракторостроения для выполнения вводимых норм на уровни вредных выбросов в атмосферу необходимо применение фильтров твердых частиц и каталитических нейтрализаторов (КН), которые позволяют повысить эффективность конверсии отработавших газов (ОГ) и улучшить экологические показатели дизельных двигателей [1-8].

Проблемам повышения экологического качества поршневых двигателей посвящены работы: Луканина В.Н., Кутенева В.Ф., Кисуленко Б.Г., Звонова В.А., Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Патрахальцева Н.Н., Кульчицкого А.Р., Фомина В.Ф., Кузнецова И.В., Новоселова А.Л., Корнилова Г.С., Панчишного В.И., Каменева В.Ф., Taylor K.C., Heywood J.B., Dumesic J.A., Topsoe N.Y., Koltakis G.C., Pontikakis G.N., Chatterjee D.L. и других российских и зарубежных ученых [1-3, 5, 7, 8].

Проблема снижения вредных выбросов поршневых двигателей внутреннего сгорания с отработавшими газами является, как отмечалось выше, актуальной в настоящее время, так как выполнение стандартов ЕВРО 4/5/6

становится все более сложно как для новой автотракторной техники, так и для уже находящейся в эксплуатации. Наиболее доступным и эффективным средством снижения вредных выбросов является применение систем последующей обработки отработавших газов (СПООГ), и в частности, нейтрализации ОГ и сажевых фильтров.

В то же время, использование традиционных технологий изготовления катализаторов, применение катализаторов из благородных металлов приводит к удорожанию очистки отработавших газов, в также к необоснованному расходу благородных металлов.

Важной указанном выше смысле задачей является использование недорогих, доступных и эффективных каталитических элементов, в том числе и получаемых с использованием современных нанотехнологий. Опыт использования технологии СВС привел к созданию многообразных концептуальных и конструктивных решений каталитических нейтрализаторов и фильтров твердых частиц [1-3].

Цель настоящего исследования состоит в решении важной задачи – сокращения вредных выбросов в атмосферу, улучшении качества и снижения стоимости очистки отработавших газов при реализации жизненных циклов объектов транспортной энергетики путем применения пористых СВС-блоков в каталитических нейтрализаторах и сажевых фильтрах.

Для достижения поставленной цели были определены задачи: провести стендовые испытания опытных образцов многоступенчатых каталитических нейтрализаторов для дизелей, разработанных в АлтГТУ им. И.И. Ползунова с пористыми блоками, полученными с помощью СВС-технологии; оценить их эффективность.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основой функционирования СПООГ является каталитический блок, в этой связи разработка каталитического блока, его покрытие и свойства имеют первостепенное значение при разработке конструкций нейтрализаторов.

В блочных каталитических нейтрализаторах степень очистки определяется из выражения [1]:

$$\eta_f = 1 - \exp(-Eu),$$

где  $Eu$  – число Эйлера,

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_B \cdot u^2} = \frac{\zeta \cdot l}{2 \cdot d_3},$$

где  $d_3$  – средний диаметр зерен материала;  $\rho_B$  – средняя плотность блоков;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления блоков.

Полное сопротивление выпуску, создаваемое каталитическим нейтрализатором, представляется как:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{акт}} + \Delta P_{\text{вых}},$$

где потери в стенке блока катализатора

$$\Delta P_{\text{акт}} = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \delta_{\text{ст}}}{d_3}; \delta_{\text{ст}} - \text{толщина стенки.}$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С целью совершенствования конструкций каталитических нейтрализаторов и улучшения конверсии отработавших газов дизелей в СПООГ, были проведены стендовые испытания опытных образцов нейтрализаторов конструкции АлтГТУ. Конструкции опытных каталитических нейтрализаторов включали различные комбинации пористых каталитических СВС-блоков. Были испытаны нейтрализаторы с одной, двумя и тремя ступенями очистки. Первая ступень – сажевый фильтр из пористого проникаемого СВС-материала, вторая ступень – окислительный СВС-блок, третья ступень – каталитический восстановительный СВС-блок. Для сравнения были испытаны также опытные образцы нейтрализаторов с псевдосжиженным слоем катализатора (ПКН-1) [2].

Для получения каталитических блоков методом СВС был использован следующий состав шихты: железная окалина 18Х2Н4МА размером частиц 60...65 мкм – 47,5%; оксид хрома ПХ-1 по ТУ 882-76 – 17,7%; порошок никеля ПНК-ОТ-1 по ГОСТ 9722-79 – 4,9%; порошок алюминия по ТУ 485-22-87 марки АСД-1 – 15% [1, 3]. Кроме того, в состав шихты окислительного блока входили: медь – 11%; оксид алюминия – 3,8%; иридий – 0,01%. В состав шихты восстановительного блока входило 14,5% меди.

Полученные блоки имели проникаемую структуру и высокую прочность. Средний размер пор составил 180 мкм. Для получения данных, об эффективности конверсии ОГ были испытаны опытные образцы нейтрализаторов на стенде с различными модификациями дизелей. Нейтрализаторы устанавливались встык с турбокомпрессором.

**Таблица 1.** Эффективность конверсии ОГ дизеля КамАЗ-740 в двухступенчатом каталитическом нейтрализаторе БКН-1 с пористыми СВС-блоками

**Table 1.** Efficiency of EG conversion of a KamAZ-740 diesel engine in a two-stage BKN-1 catalytic converter with porous SHS blocks

Оценочные показатели	Значения оценочных показателей, г/(кВт·ч)							Степень превышения допустимых выбросов по стандартам ЕВРО-4/5/6/РФ после КН
	допустимые стандартами					действительные		
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)	до нейтрализатора	после нейтрализатора	
$q_{\text{ОЦ}} \text{NO}_x$	5,00	3,50	2,00	0,40	6,00	11,13	5,93	1,69/2,97/14,82/0,99
$q_{\text{ОЦ}} \text{CO}$	2,10	1,50	1,50	1,50	3,50	11,9	2,62	1,75/1,75/1,75/0,75
$q_{\text{ОЦ}} \text{C}_x\text{H}_y$	0,60	0,46	0,25	0,13	0,40	0,33	0,12	0,26/0,48/0,92/0,3
$q_{\text{ОЦ}} \text{ТЧ}$	0,10	0,02	0,02	0,01	0,10	0,35	0,13	6,5/6,5/13/1,3

Стенды оборудовались согласно ГОСТ, испытания нейтрализаторов с дизелями, соответствовали стандартам Российской Федерации и прошли испытания, с каждым блоком отдельно, по нагрузочным и внешней скоростной характеристикам [3]. Были испытаны полые цилиндрические каталитические блоки длиной 320 мм и внешним диаметром 148 мм. Корпус опытного нейтрализатора был спроектирован таким образом, что имелась возможность последовательно установить пористые проникаемые блоки. Заменяя отдельные блоки на перфорированные патрубки такого же внешнего диаметра и той же длины, появилась возможность последовательно получать нейтрализатор с одной, двумя и тремя ступенями очистки. Стальные перфорированные патрубки, создавали противодавление выпуску в пределах 588–686 Па [2, 3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний опытного образца нейтрализатора с СВС-блоками конструкции АлтГТУ им. И.И. Ползунова БКН-1 представлены на рис. 1.

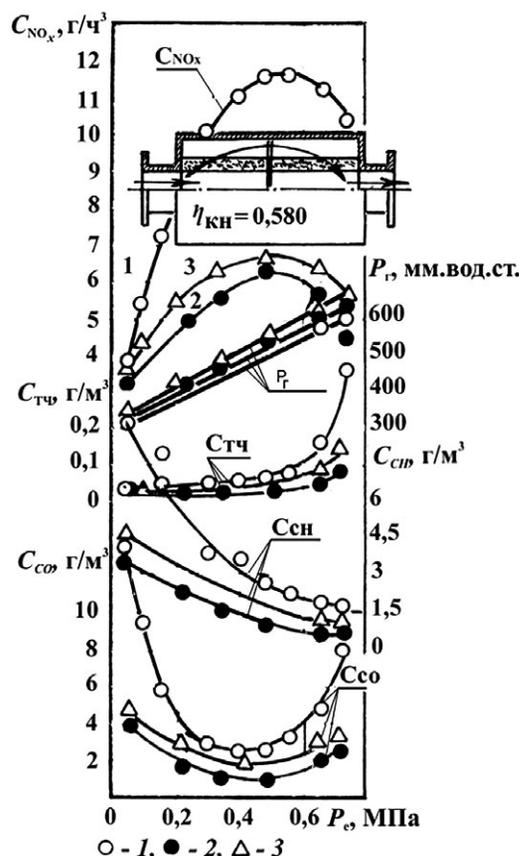
Отмечено, что выбросы  $\text{NO}_x$  по нагрузочной характеристике дизеля КамАЗ-740 при 2600 мин<sup>-1</sup> уменьшаются при средних эффективных давлениях  $P_e$ , равных 0,03; 0,55; 0,77 МПа с 3,82–11,62–9,49 г/м<sup>3</sup> соответственно до 3,23–6,52–4,61 г/м<sup>3</sup> или примерно на 13–44–53%.

В табл. 1 приведены данные об эффективности конверсии отработавших газов в нейтрализаторе БКН-1 с приведенным выше составом шихты СВС-пористых блоков.

Здесь эффективность восстановления  $\text{NO}_x$  связана с ростом температуры отработавших газов при увеличении нагрузки  $P_e$ . Уменьшение выбросов твердых частиц при тех же нагрузках составило 75; 45; 63%, углеводородов – 72; 53; 54%. Минимальный удельный расход топлива наблюдался в интервале 1600–2000 мин<sup>-1</sup> по внешней скоростной характеристике. При использовании нейтрализатора с двумя, установленными

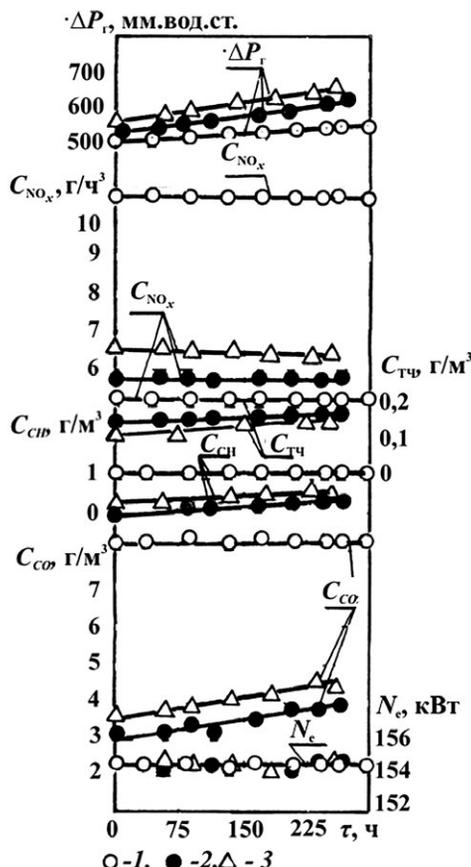
последовательно каталитическими блоками, выбросы с ОГ углеводородов уменьшились с 3,12–1,21 до 0,90–0,29 г/м<sup>3</sup>, или на 71–76%. Степень конверсии СО, составила 78–73%; NO<sub>x</sub> – 4–52%, а суммарный коэффициент очистки составил  $\eta_{\text{KH}} = 0,58$ .

При усовершенствовании блочных нейтрализаторов коаксиальная установка дополнительных блоков из СВС-каталитических материалов привела к улучшению качества очистки до  $\eta_{\text{KH}} = 0,698$ . За 360 часов работы эффективность конверсии ТЧ уменьшилась с 55



**Рис. 1.** Результаты испытаний нейтрализатора БКН-1 с СВС-блоками для дизеля КАМАЗ-740 по нагрузочной характеристике при 2600 мин<sup>-1</sup>: 1 – без КН; 2 – одна ступень; 3 – две ступени.

**Fig. 1.** Test results for the BKN-1 converter with SHS blocks for the KamAZ-740 diesel engine in terms of load characteristics at 2600 min<sup>-1</sup>: 1 – without CV; 2 – one step; 3 – two steps.



**Рис. 2.** Эффективность конверсии ОГ дизеля КАМАЗ-740: 1 – 280 ч, без КН; 2 – 265 ч, нейтрализатор ПКН-1; 3 – 260 ч, нейтрализатор БКН-2.

**Fig. 2.** Efficiency of diesel KamAZ-740 EG conversion: 1 – 280 h, without CV; 2 – 265 h, neutralizer PKN-1; 3 – 260 h, neutralizer BKN-2.

**Таблица 2.** Эффективность конверсии ОГ дизеля КАМАЗ-740 в БКН-2 комбинированного типа с пористыми СВС-блоками

**Table 2.** Efficiency of EG conversion of a KamAZ-740 diesel engine in a two-stage BKN-1 catalytic converter with porous SHS blocks

Оценочные показатели	Значения оценочных показателей, г/(кВт·ч)							Степень превышения допустимых выбросов по стандартам ЕВРО-4/5/6/РФ после КН
	допустимые стандартами					действительные		
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)	до нейтрализатора	после нейтрализатора	
$q_{\text{O}_2\text{NO}_x}$	5,00	3,50	2,00	0,40	6,00	8,86	6,11	1,75/3,01/15,28/1,02
$q_{\text{O}_2\text{CO}}$	2,10	1,50	1,50	1,50	3,50	4,93	1,48	0,98/0,98/0,98/0,42
$q_{\text{O}_2\text{C}_x\text{H}_y}$	0,60	0,46	0,25	0,13	0,40	1,23	0,43	0,93/1,72/3,3/1,08
$q_{\text{O}_2\text{TЧ}}$	0,10	0,02	0,02	0,01	0,10	0,40	0,06	3,0/3,0/6/0,6

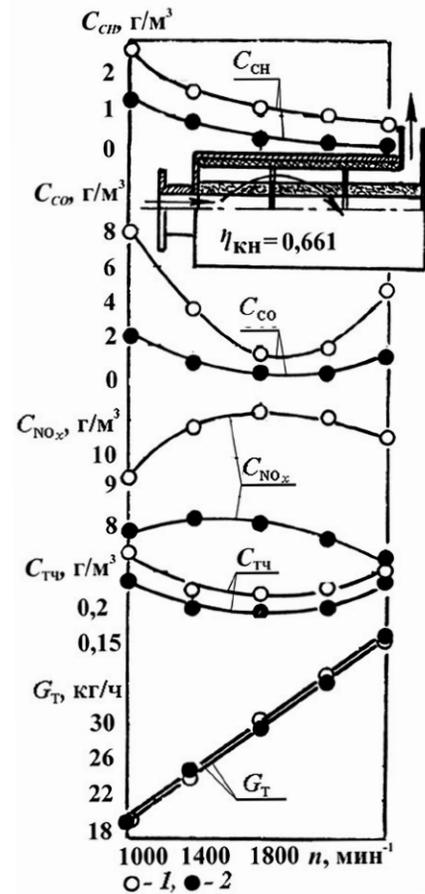
до 45%, CO – с 58 до 46%, NO<sub>x</sub> – с 65 до 44%, что свидетельствовало о начале дезактивации катализаторов.

Сравнительные испытания с дизелем КамАЗ-740 и Д-461 нейтрализаторов с псевдосжиженным слоем катализатора ПKN-1 и с блочными катализаторами БKN-2 дали возможность оценить стабильность конверсии отработавших газов при 2600 мин<sup>-1</sup> на режиме полной мощности (рис. 2). Максимальные противодавления на выпуске достигают 6031 Па для нейтрализатора с псевдосжиженным слоем катализатора, а для нейтрализатора с пористыми СВС-блоками – 6570 Па.

Оценка степени конверсии газов в нейтрализаторе комбинированного типа БKN-2 с пористыми проницаемыми каталитическими блоками, проведенная по 13-режимному испытательному циклу (табл. 2), показала, что уровни выбросов вредных веществ практически не превышают норм стандартов Российской Федерации [3]. Вместе с тем, выполнение норм ЕВРО-4/5/6 связано с преодолением недостаточного качества очистки газов от NO<sub>x</sub> и ТЧ. По-видимому, выполнение указанных норм по выбросам ТЧ потребует доработки блоков фильтрации или введения каталитического дожигания их в системе выпуска.

Факт существования в среде отработавших газов дизеля твердых частиц вызывает преждевременные отказы нейтрализаторов из-за загрязнения пористых каталитических структур частицами сажи и кокса. Именно поэтому сажевые фильтры (фильтры ТЧ) в структуре каталитической очистки ОГ должны представлять отдельный элемент. Фильтр ТЧ может быть вмонтирован в каталитический нейтрализатор или быть отдельным. Опыт зарубежных компаний показал, что увеличение сроков эффективной очистки отработавших газов, прежде всего, связано с качеством предварительной очистки газов от ТЧ. Использование многоступенчатых каталитических нейтрализаторов улучшает качество очистки отработавших газов [3]. При этом, с одной стороны, могут увеличиваться противодавления на выпуске, удельный расход топлива дизелем, с другой – происходит увеличение

температуры отработавших газов перед нейтрализаторами и создаются условия для обеспечения рабочих температур катализаторов, что способствует, в частности, более глубокому окислению продуктов неполного сгорания, включая сажу. В многоступенчатом нейтрализаторе есть возможность разделить каталитические блоки



**Рис. 3.** Эффективность конверсии отработавших газов дизеля КамАЗ-740 по внешней скоростной характеристике: 1 – без КН; 2 – с БKN-2.

**Fig. 3.** Efficiency of conversion of exhaust gases of a KamAZ-740 diesel engine according to the external speed characteristic: 1 – without CV; 2 – with BKN-2.

**Таблица 3.** Эффективность конверсии ОГ дизеля 5Д6-192 в каталитическом нейтрализаторе БKN-2 комбинированного типа с пористыми СВС-блоками

**Table 3.** Efficiency of EG conversion of diesel 5D6-192 in the BKN-2 catalytic converter of the combined type with porous SHS blocks

Оценочные показатели	Значения оценочных показателей, г/(кВт·ч)							Степень превышения допустимых выбросов по стандартам ЕВРО-4/5/6/РФ после КН
	допустимые стандартами					действительные		
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)	до нейтрализатора	после нейтрализатора	
$\eta_{\text{O}_2 \text{NO}_x}$	5,00	3,50	2,00	0,40	6,00	11,04	5,38	1,54/2,69/13,45/0,9
$\eta_{\text{O}_2 \text{CO}}$	2,10	1,50	1,50	1,50	3,50	12,20	3,41	2,27/2,27/2,27/0,97
$\eta_{\text{O}_2 \text{C}_x \text{H}_y}$	0,60	0,46	0,25	0,13	0,40	0,37	0,19	0,41/0,76/1,46/0,48
$\eta_{\text{O}_2 \text{TЧ}}$	0,10	0,02	0,02	0,01	0,10	0,32	0,11	5,65/5,65/11/1,1

по функциям: фильтры ТЧ, окислительные и восстановительные блоки.

На рис. 3 показана эффективность конверсии ОГ по внешней скоростной характеристике дизеля КамАЗ-740 при использовании многоступенчатого нейтрализатора. Эффективность очистки при таком нейтрализаторе достигает  $\eta_{\text{кн}} = 0,661$ .

Эффективность конверсии ОГ в многоступенчатых нейтрализаторах подтверждена результатами стендовых испытаний с дизелем 5Д6-192 по 13-режимному испытательному циклу, предусмотренному документацией ЕЭК ООН [3]. Результаты испытаний представлены в табл. 3. Из них видно, что созданные конструкции обеспечивают выполнение норм, представленных стандартами Российской Федерации. В то же время для обеспечения выполнения норм, предусмотренных стандартом ЕВРО-4/5/6, требуется доработка, как самого дизеля, так и нейтрализатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Выполнение требований, предусмотренных стандартами ЕВРО-4/5/6 на последующие годы затруднительно без применения каталитических нейтрализаторов и фильтров твердых частиц в СПООГ.
2. Требуется доработка конструкций нейтрализаторов и фильтров твердых частиц, введения каталитического дожига ТЧ в системе выпуска, а также применение комплексных комбинированных систем конверсии газов.
3. Перспективным направлением, является применение пористых каталитических блоков, не содержащих в своем составе благородных и редкоземельных металлов.
4. Использование многоступенчатых нейтрализаторов с СВС-каталитическими блоками в СПООГ позволяют уменьшить выбросы углеводородов в 1,95 раза, оксида углерода в 3,6 раза, оксидов азота в 2 раза, твердых частиц в 3 раза, обеспечивая выполнение стандартов Российской Федерации.
5. Для увеличения эффективности конверсии и улучшения каталитической очистки отработавших газов

может быть рекомендована подача дополнительных газов или воздуха в реакторы, организация раздельной очистки отработавших газов в многоступенчатых нейтрализаторах.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** А.А. Мельберт — подготовка к испытаниям, обработка результатов исследования, написание текста рукописи; Ч.Х. Нгуен — обзор литературы, проведение испытаний, обработка результатов исследования, редактирование текста рукописи; А.В. Машенский — проведение испытаний, обработка результатов; В.А. Соколова — обзор литературы, обработка результатов, редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** A.A. Melbert — preparation for testing, processing results of present study, writing the text of the manuscript; Tr.H. Nguyen — literature search, testing, processing of research results, editing the text of the manuscript; A.V. Mashensky — testing, results processing; V.A. Sokolova — literature search, processing of results, editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work. The authors prove compliance of their authorship with ICMJE criteria.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов А.Л., Мельберт А.А., Жуйкова А.А. Применение СВС-материалов при решении экологических проблем транспорта. Новосибирск: Наука, 2007.
2. Новоселов, А.Л., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Совершенствование очистки отработавших газов дизелей на основе СВС-материалов / под ред. В.В. Евстигнеева. Новосибирск: Наука, 2001.
3. Мельберт А.А., Новоселов А.А. Каталитическая очистка отработавших газов дизелей / под ред. А.А. Мельберт. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017.
4. Кирасиров О.М., Нестеренко Г.А., Старичков В.И. Нейтрализация выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 5–2(10). С. 87–91.

5. Корнилов Г.С. Создание систем очистки отработавших газов дизелей // Приводная техника. 2005. № 3. С. 16–21.
6. Yang S., Deng C., Gao Y., et al. Diesel particulate filter design simulation. A review // *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 8, N 3. P. 1–14. doi: 10.1177/1687814016637328

7. Venkatesh L., Logeshkumar R., Jayaprakash G., et al. Control and reduction of emissions using catalytic converter // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4, N 11. P. 788–794.
8. 30 years in the development of autocatalysis // *Platinum*. 2004. Vol. 6. P. 32–37.

## REFERENCES

1. Novoselov AL, Melbert AA, Zhuikova AA. *Application of SHS-materials in solving environmental problems of transport*. Novosibirsk: Nauka; 2007. (in Russ).
2. Novoselov AL, Prolebnikov VI, Tubalov NP. *Improving the purification of exhaust gases of diesel engines based on SHS materials* / ed. VV Evstigneeva. Novosibirsk: Nauka; 2001. (in Russ).
3. Melbert AA, Novoselov AA. *Catalytic purification of diesel exhaust gases*. / ed. A.A. Melbert. Barnaul: Izd-vo AltGTU; 2017. (in Russ).
4. Kirasirov OM, Nesterenko GA, Starichkov VI. *Neutralization of exhaust gases of internal combustion engines of automobiles*. National Association of Scientists. 2015;5–2(10):87–91. (in Russ).
5. Kornilov GS. Creation of diesel exhaust gas cleaning systems. *Privodnaya tekhnika*. 2005;3:16–21. (in Russ).
6. Yang S, Deng C, Gao Y, et al. Diesel particulate filter design simulation. A review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016;8(3):1–14. doi: 10.1177/1687814016637328
7. Venkatesh L, Logeshkumar R, Jayaprakash G, et al. Control and reduction of emissions using catalytic converter. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;04(11):788–794.
8. 30 years in the development of autocatalysis. *Platinum*. 2004;6:32–37.

## ОБ АВТОРАХ

**\*Мельберт Алла Александровна**, д.т.н., профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»; адрес: Россия, 656000, Барнаул, пр-т Ленина, д. 46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>; eLibrary SPIN: 5949-5831; e-mail: aamelbert@mail.ru

**Нгуен Чан Хынг**, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0276-2303>; eLibrary SPIN: 5702-0442; e-mail: hungtnut.nguyen@gmail.com

**Машенский Александр Викторович**, инженер, соискатель кафедры «Безопасность жизнедеятельности»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-8648>; eLibrary SPIN: 6339-5630; e-mail: aleksandr.mashenskiy@mail.ru

**Соколова Виктория Александровна**, к.т.н., доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>; eLibrary SPIN: 5116-5102; e-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

\*Автор, ответственный за переписку

## AUTHORS' INFO

**\*Alla A. Melbert**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Life Safety Department; address: 46 Lenina avenue, 656000 Barnaul, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>; eLibrary SPIN: 5949-5831; e-mail: aamelbert@mail.ru

**Tran Hung Nguyen**, Post Graduate; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0276-2303>; eLibrary SPIN: 5702-0442; e-mail: hungtnut.nguyen@gmail.com

**Alexander V. Mashensky**, Engineer, Graduate of the Life Safety Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-8648>; eLibrary SPIN: 6339-5630; e-mail: aleksandr.mashenskiy@mail.ru

**Viktoria A. Sokolova**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>; eLibrary SPIN: 5116-5102; e-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

\*Corresponding author