

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-79-88

УДК 62-1/-9

**Н. С. ЯНКЕВИЧ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук

**А. С. ПОВАРЕХА**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Центр системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

## РАЗРАБОТКА НОСИТЕЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

### Аннотация

Рассмотрены вопросы разработки носителя каталитического нейтрализатора, сформированного тремя различными способами (отходы проволоочного производства, пеноникель и металлическая лента). Приведены результаты экспериментальных исследований.

### Ключевые слова:

каталитическая очистка, нейтрализатор, носитель, двигатель внутреннего сгорания.

### Для цитирования:

Янкевич, Н. С. Разработка носителя каталитического нейтрализатора для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / Н. С. Янкевич, А. С. Повареха // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 79–88.

### Введение

Необходимость сохранения окружающей среды в пригодном для жизни будущих поколений виде является актуальной задачей для промышленно развитых стран. Установлено, что радикальное снижение токсичности отработавших газов может быть достигнуто путем каталитической нейтрализации. Уже с середины 1970-х гг. каталитические преобразователи были признаны универсальным методом очистки выхлопных газов. Вместе с тем ряд вопросов, связанных с разработкой надежного носителя для каталитической композиции, до сих пор не решен. Поэтому разработка, исследование и внедрение отечественных нейтрализаторов – одно из важнейших условий оздоровления населения, которое должно стать приоритетным в развитии автомобильной промышленности.

Для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания используют два типа катализаторов: ката-

лизаторы окисления, преобразующие несгоревшие углеводороды и монооксид углерода в диоксид углерода и воду, и трехмаршрутные, которые, кроме того, преобразуют оксиды азота в азот. Катализаторы могут преобразовывать более 90 % этих загрязняющих веществ. Если они сочетаются с соответствующими техническими системами, то могут удовлетворять любые существующие или предлагаемые стандарты по контролю за отработавшими газами.

В катализаторах очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания имеется пять основных компонентов: субстрат, подложка (носитель), стабилизаторы, основные металлические промоторы и, как правило, металлы платиновой группы. Наиболее широко используемыми субстратными материалами являются многочисленные керамические материалы, которые имеют открытые площади, однако при этом наблюдается повышение противодавления в выхлопной системе. Для форсированных двигателей используются также

металлические блоки, особенно в ситуациях, где требуются большая открытая площадь, высокие температуры и более низкое противодавление.

Для того чтобы увеличить площадь поверхности монолита, применяется покрытие из пористого материала (обычно оксида алюминия). К нему часто добавляют стабилизаторы, чтобы поддержать высокую площадь поверхности при повышенных температурах, которые нередко могут появиться в рабочих условиях. Промоторы используют для улучшения активности или селективности катализатора. Они могут иметь сильное влияние на производительность.

Формирование сотовых керамических носителей происходит во время отжига при высокой температуре, что приводит к получению образцов с разветвленной поверхностью. Развитие их общей поверхности достигается внесением вторичного носителя и зависит от характера наносимых оксидов ( $Al_2O_3$ , алюмомагниево-шпинели с добавками оксидов циркония, вольфрама и др.). В основном приготовление катализаторов на блоках проводится с применением метода последовательного нанесения вначале вторичного носителя для развития поверхности, а затем активных компонентов. Вторичный носитель (чаще всего  $Al_2O_3$ ) наносят на керамические или металлические блоки (первичный носитель) из азотнокислых или аммиачных растворов солей, способных образовывать труднорастворимые гидроксиды, либо из суспензии соответствующих оксидов в присутствии связующих (нитрат или хлорид алюминия, органические кислоты).

На втором этапе приготовления блоки с вторичным носителем пропитывают растворами смеси солей благородных и неблагородных металлов, иногда в присутствии органических веществ: метилцеллюлозы, лактозы и др. Затем катализаторы высушивают и прогревают в атмосфере воздуха или водорода при 300 °С...900 °С.

Толщина слоя вторичного носителя, по различным данным, может колебаться от 50 до 300 мкм и получается путем многократной пропитки из растворов (от 3–6 до 12 раз).

Решающими факторами при использовании любого блочного катализатора являются число ячеек на единице поверхности и характер пористой структуры вторичного носителя, а также химический состав катализатора.

Вместе с тем вопрос разработки первичного носителя для нанесения каталитической композиции, обладающего значительным эксплуатационным ресурсом, остается актуальным, особенно для мощных двигателей.

### **Основная часть**

*Разработка конструкции каталитического блока.* Велись работы по созданию конструкции глушителя-нейтрализатора для форсированных дизельных двигателей, что позволяет максимально использовать серийные детали. Работы выполнялись последовательно по трем направлениям: создание каталитического блока на основе отходов проволочного производства, пеноникеля и стальной фольги.

*Разработка носителя на основе отходов проволочного производства.* Следуя известному тренду, связанному с использованием отходов существующих производств, прежде всего усилие было сосредоточено именно в этом направлении. Предложен метод использования отходов проволочного производства для изготовления носителя каталитического блока, заключающийся в последовательности следующих операций:

1) отходы проволочного производства с помощью специальной оправки прессуются;

2) сформованный образец помещается в вакуумную печь и нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, в целях обеспечения сцепления проволочек между собой.

Так как противодействие является одной из важнейших характеристик устанавливаемой каталитической системы, работы, позволяющие оценить эффективность выбранных решений, были выполнены, прежде всего, для мотоциклетного двигателя ММВЗ-3.114.

Полученные образцы обладают достаточно высокой механической прочностью и выдерживают силу растяжения сжатия до 100 Н. Вместе с тем их высокая плотность исключила возможность использования в качестве носителя каталитического блока даже для

мотоциклетных двигателей (при проведении натурных испытаний установлено превышение противодействия в 10 раз по сравнению с серийной конструкцией глушителя). С учетом того, что технология нанесения каталитической композиции предполагает нанесение подложки, что еще более увеличит противодействие, данное решение было признано неэффективным для применения на мощных двигателях.

Вид полученных макетных образцов показан на рис. 1.



Рис. 1. Макетные образцы носителя каталитического блока, полученные из отходов проволочного производства

*Разработка носителя на основе пеноникеля.* Разработана конструкция нейтрализатора (рис. 2), действующего следующим образом. Отрабатывшие газы двигателя через приемную трубу поступают на вход нейтрализатора со стороны лямбда-датчика. Последний устанавливается с горячей стороны, т. к. для его нормальной работы требуется температура не менее 300 °С на двигателе с

обычной системой впрыска. На бензиновом двигателе с упрощенной системой подачи топлива лямбда-датчик не устанавливается. Пройдя через ряд отверстий центральной трубы, отрабатывшие газы попадают на катализатор, где и происходит процесс каталитического окисления. Блок нейтрализации имеет наборную конструкцию, и число пластин может изменяться в зависимо-

сти от требований по цене и степени очистки. Далее газы проходят наружное кольцевое отверстие и попадают в вы-

пускную трубу. Нейтрализатор на базе глушителя 60-1205015-А (ММЗ) представлен на рис. 2.



Рис. 2. Нейтрализатор на базе глушителя 60-1205015-А (ММЗ)

При таком исполнении описанная конструкция глушителя выполняет следующие функции:

- глушителя (наличие камер как резонансного, так и активного типа позволяет повысить его характеристики, по сравнению с прототипом, при заведомо небольшом сопротивлении);

- нейтрализатора (пластины пеннистого материала покрыты каталитической композицией);

- искрогасителя (наличие перегородок из пеннистого металла позволяет повысить характеристики искрогашения).

Вместе с тем носитель, изготовленный из пеноникеля, обладает сравнительно низкой термической прочностью, что подтвердили натурные испытания, проведенные ОАО «Минский тракторный завод».

В ходе испытаний установлено, что разрушение носителя, изготовленного из пеноникеля, происходит в течение трех месяцев эксплуатации.

Поэтому основное внимание было сосредоточено на изготовлении носителя из металлической (стальной) фольги.

*Разработка носителя из металлической фольги.* Решение поставленной задачи достигается в блоке нейтрализатора (рис. 3), имеющем сечение в виде овала с межцентровым расстоянием  $L$  и радиусами окружностей  $R$ , образованном плоскими и гофрированными металлическими полосами, причем плоские металлические полосы шириной  $H$  и длиной  $L(1/\cos\varphi + 1) + \pi R$ , где  $L$  – межцентровое расстояние овала, радиус окружностей,  $\varphi = \arctg(R/L)$ , предварительно сдвинуты друг относительно друга на расстояние  $\Delta(\tg\varphi + \pi/\cos\varphi + 1/\sin\varphi)$ , где  $\Delta$  – высота гофр, а затем свернуты в рулон. При этом в целях повышения жесткости конструкции сформованный блок зафиксирован с краев металлическими сеткой и хомутами. Такое исполнение подложки каталитического блока нейтрализатора отработавших газов ДВС позволяет удовлетворить практи-

чески любые требования, предъявляемые к компоновке (обзорности), а также контролировать процесс нанесения ка-

талитического покрытия, в том числе визуально, на всех его стадиях.

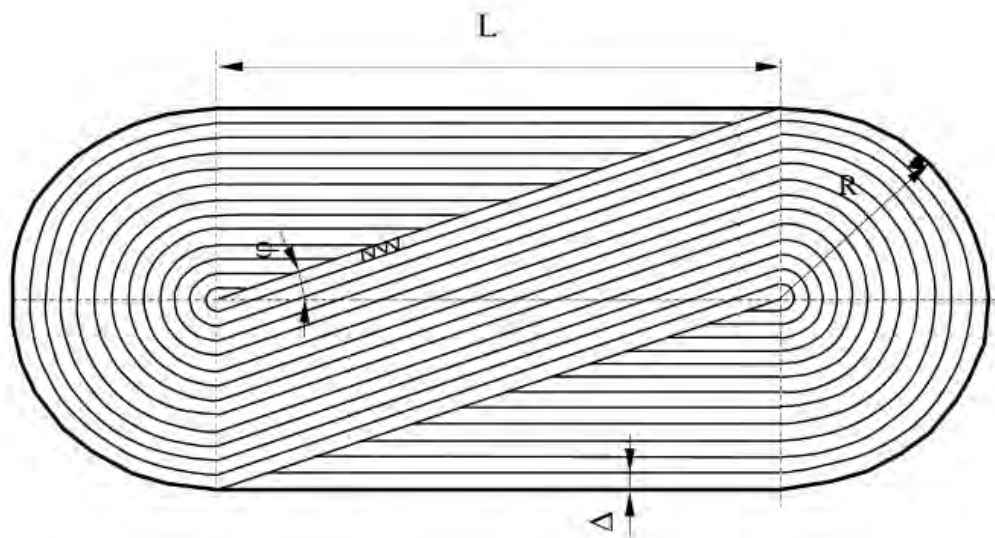


Рис. 3. Схема для расчета относительного расположения листов подложки каталитического нейтрализатора до сворачивания

Нейтрализатор работает следующим образом. При попадании отработавших газов через входной патрубок в нейтрализатор газовые потоки пройдут по сквозным каналам, образованным плоскими и рифлеными сплошными металлическими полосами. После очистки в каталитическом блоке газовый поток выходит из нейтрализатора.

Охватывающая каталитический блок оболочка изготовлена из листа, толщина которого в 5–8 раз превышает толщину плоских и рифленых полос, что обеспечивает необходимую жесткость конструкции нейтрализатора.

При этом нужно отметить, что обычно применяемый листовой алюминий обладает сравнительно низкой термической стойкостью, поэтому для нейтрализаторов мощных двигателей следует рассматривать изготовление из листовой стали (например, 12X18H10T).

Таким образом, предложенная конструкция нейтрализатора отрабо-

тавших газов ДВС может быть успешно применена для мощных двигателей при необходимости повышения эффективности и долговечности каталитического блока.

*Разработка каталитической композиции.* Для реализации процесса очистки отработавших газов дизельного двигателя был разработан каталитический блок из металлической фольги, в качестве активного компонента на поверхность которого была нанесена специально разработанная наноконпозиция, содержащая оксид церия. Обычно оксид церия очень широко используется в современных катализаторах. Ранее считали, что основная функция этого компонента – накопление кислорода в обедненных кислородом условиях. В окислительной атмосфере выхлопных газов ДВС, приводимых в действие обедненной топливной смесью, оксид церия захватывает кислород до тех пор, пока окончательно не превращается в теоретическую фор-

му  $\text{CeO}_2$ . В восстановительной атмосфере, такой как отработавшие газы ДВС, приводимые в действие смесью, обогащенной топливом, оксид церия теряет кислород, пока сам не переходит в дефицитное, по отношению к кислороду, состояние.

Закономерности окисления СО на синтезированных нанокompозициях изучали на установке проточного типа после предварительного восстановления образцов водородом при 330 °С в течение двух часов. Содержание СО в газовой смеси с воздухом – 1,0 об. %. Скорость подачи газовой смеси – 10000 ч<sup>-1</sup>.

Полученные в ходе лабораторных испытаний данные представлены в табл. 1. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

Все синтезированные нанокompозиции являются низкотемпературными катализаторами окисления СО.

Повышение температуры отжига образцов с 500 °С до 800 °С сопровождается ростом их активности в реакции окисления СО, что видно из снижения температур, при которых достигаются указанные в таблице степени окисления СО.

Введение связующего слоя при-

водит, как и ожидалось, к некоторому снижению активности нанокompозиций в реакции окисления СО, однако температуры полного окисления СО на всех образцах были значительно ниже 100 °С.

Все образцы со связующим имели хорошую механическую прочность. Образец 5 (без связующего) такой прочностью не обладал, но после отжига при 800 °С имел самую высокую активность.

Эффективность композиции 4 была подтверждена дополнительно в ходе натурных испытаний, выполненных для мотоцикла ММВЗ-3.114, укомплектованного каталитическим блоком (табл. 2) [2].

Так как рассматриваемая каталитическая композиция в совокупности с системой дополнительной подачи воздуха в выхлопную трубу показала хорошие результаты (очистка по СО – до 65,6 %...77,5 %, по СН – около 100 % на различных режимах работы двигателя), то каталитическая композиция 4 была нанесена на блок, изготовленный из металлической фольги (сталь 12Х18Н10Т, толщина – 0,1...0,15 мм) (рис. 4).

Табл. 1. Результаты испытаний синтезированных нанокompозиций в реакции окисления монооксида углерода

Химический состав нанокompозиции, мас. %						Температура отжига, °С	Степень окисления СО, % при различных температурах			
CeO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	PdO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Глина		25	50	75	90
5,0	20,2	1,3	40,3	3,0	30,2	500	37	49	59	68
5,0	20,0	1,0	44,0	5,0	25,0	500	39	53	66	75
5,0	20,0	1,0	44,0	5,0	25,0	800	42	51	60	72
5,0	20,0	2,0	43,0	–	30,0	500	30	41	49	58
5,0	20,0	1,0	49,0	–	25,0	500	41	61	79	87
5,0	40,0	1,0	51,0	3,0	–	500	43	57	68	78
5,0	40,0	1,0	51,0	3,0	–	800	32	40	44	47



Табл. 2. Сравнительные замеры содержания CO и CH в отработавших газах бензинового двигателя, установленного на мотоцикле ММВ3-3.114

Серийная выпускная система			Выпускная система с подачей воздуха в выпускной трубопровод			Выпускная система, оборудованная экспериментальным катализатором (композиция 4) и системой подачи воздуха		
$n, \text{об}^{-1}$	CO, %	CH, ppm	$n, \text{об}^{-1}$	CO, %	CH, ppm	$n, \text{об}^{-1}$	CO, %	CH, ppm
Замер не проводился			Замер не проводился			1000	0,00	001
1600	2,1	138	1600	1,2	137	1600	0,16	001
2100	3,5	151	2100	2,1	151	1880	0,16	001
2500	3,75	278	2500	2,5	258	2550	0,30	001
Замер не проводился			Замер не проводился			3050	0,60	001



Рис. 4. Каталитический блок с нанесением каталитической композиции

*Испытания каталитического нейтрализатора. Анализ результатов.* Изготовлен глушитель-нейтрализатор отработавших газов (рис. 5) для двигателя мощностью до 190 л. с. В качестве объекта для испытаний выбран дизельный двигатель ЯМЗ-238КМ2, установленный на дрезине (рис. 6).

Результаты замеров, выполненных специализированной лабораторией

УП «Метрострой», показали, что степень очистки по CO достигла 33 %, CH – 15 %, NO<sub>x</sub> – 8 %.

После проведения испытаний блоки были извлечены из нейтрализатора и было установлено, что достигнутая сравнительно невысокая степень очистки обусловлена недостатками разработанной технологии нанесения катализатора. Блоки с нане-

сенным вторичным покрытием, состоящим из оксидов алюминия, кремния, церия, бентонита и активного каталитического слоя, были получены методом погружения в суспензию из гидроксидов указанных компонентов, продувки каналов блока (в целях получения более равномерного покрытия) и последующим отжигом на воздухе

при температуре 500 °С...800 °С.

Установлено, что высота блока не позволила организовать эффективно продувку каналов и каталитическая композиция оказалась нанесенной по краям блока на глубину 1,5...2,0 см. На остальной поверхности металлической ленты каталитическое покрытие отсутствовало.



Рис. 5. Макетный образец глушителя-нейтрализатора



Рис. 6. Установка глушителя-нейтрализатора на дрезину, укомплектованную двигателем ЯМЗ-238 КМ2



Результаты замеров могли быть обусловлены как недостаточно отработанной технологией нанесения каталитического покрытия, так и высокой объемной скоростью прохождения от-

работавших газов. В целях снижения объемной скорости была разработана конструкция, предусматривающая параллельную установку двух глушителей-нейтрализаторов (рис. 7).



Рис. 7. Глушитель-нейтрализатор, обеспечивающий уменьшение объемной скорости отработавших газов в 2 раза

К возможным недостаткам предложенной конструкции можно отнести, в частности, нарушение обзорности. Этот недостаток может быть устранен при изменении компоновочного решения, предусматривающего работу нейтрализатора в качестве промежуточного глушителя.

С учетом принятого на практике для двигателей мощностью 150...200 л. с. значения объемной скорости и лабораторных данных по эффективности степени очистки катализатора по СО разработана конструкция макетного образца нейтрализатора, работающего по принципу промежуточного глушителя, позволяющая улучшить обзорность и организовать термоизоляцию более эффективно.

Другим решением может быть со-

здание глушителя-нейтрализатора, состоящего из нескольких встроенных блоков шириной 20...30 мм, изготовленных из металлической фольги. Нанесение каталитической композиции на блоки такой ширины позволит организовать эффективную продувку при нанесении как слоя  $Al_2O_3$ , так и каталитической композиции.

### **Заключение**

В настоящее время каталитическая очистка является наиболее эффективным методом снижения содержания вредных примесей в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания.

Предложена конструкция каталитического блока, изготовленная из стальной ленты толщиной 0,1...0,15 мм.

Получены трехмаршрутные низкотемпературные каталитические композиции, проведены лабораторные испытания.

Выполнены натурные испытания глушителя-нейтрализатора, изготов-

ленного на основе разработанного металлического блока с нанесенной каталитической композицией.

По результатам испытаний предложены направления дальнейших исследований.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леонов, А. Н.** Сравнительная оценка свойств блочных носителей сотового и ячеистого строения с точки зрения использования в процессах каталитической очистки газов / А. Н. Леонов // Кинетика и катализ. – 1998. – Т. 39, № 5. – С. 691–700.

2. **Янкевич, Н. С.** Очистка отработавших газов мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания / Н. С. Янкевич, В. М. Шаппо, А. И. Поберайло // Стандартизация. – 2009. – № 5. – С. 49–51.

*Статья сдана в редакцию 25 июня 2025 года*

Контакты:

lab\_12@tut.by (Янкевич Наталья Степановна);

asrov@yandex.by (Повареха Александр Сергеевич).

***N. S. YANKEVICH, A. S. POVAREKHO***

#### **DEVELOPMENT OF A CATALYTIC CONVERTER CARRIER FOR PURIFYING EXHAUST GASES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

##### **Abstract**

The article examines the development of a catalytic converter carrier formed by using three different methods (wire production waste, nickel foam, and metal tape). The results of experimental studies are presented.

##### **Keywords:**

catalytic purification, catalytic converter, carrier, internal combustion engine.

##### **For citation:**

Yankevich, N. S. Development of a catalytic converter carrier for purifying exhaust gases in internal combustion engines / N. S. Yankevich, A. S. Povarekho // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 79–88.