

УДК 62-1/-9

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-33-38

**ОЧИСТКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «МОТОВЕЛО»***канд. техн. наук Н.С. ЯНКЕВИЧ**(Центр системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, Минск)**С.Н. ЯНКЕВИЧ**(ОАО «МотоВело», Минск)*

В настоящее время наиболее универсальным методом снижения содержания вредных примесей в отработавших газах признано каталитическое дожигание. Известны каталитические системы для дожига всех нормируемых компонентов или их комбинаций (трехмаршрутные катализаторы). Вместе с тем вопрос создания новых конструкторско-технологических решений по-прежнему остается актуальным в связи с тем, что применение штатной системы на конкретном двигателе внутреннего сгорания, как правило, сопровождается рядом затруднений.

В статье рассматриваются исследования по разработке каталитического нейтрализатора для бензиновых мотоциклетных двигателей.

Ключевые слова: каталитическая очистка, нейтрализатор, носитель, двигатель внутреннего сгорания.

Введение. Необходимость сохранения окружающей среды в пригодном для жизни будущих поколений виде осознается все большим числом населения промышленно развитых стран. Основную роль в загрязнении атмосферы играют выбросы автотранспорта (60%), промышленности (17%) и энергетики (14%). Как видно, проблема снижения токсичности отработавших газов автотранспорта остается достаточно актуальной.

Радикальное снижение токсичности отработавших газов в 10 и более раз может быть достигнуто только путем каталитической нейтрализации. Уже с середины 1970-х годов в США и Японии, а позднее в Австралии каталитические преобразователи были признаны универсальным методом очистки.

Срок службы современных катализаторов двигателей внутреннего сгорания определяется главным образом термической дезактивацией [1], т.к. химическую дезактивацию можно значительно уменьшить путем использования тетраэтилсвинца. Степень дезактивации зависит не только от максимальной температуры, действию которой подвергался катализатор, но и от диапазона изменения соотношения воздух–топливо (A/F) при высокотемпературном воздействии во время выхлопа.

Чтобы удовлетворить предполагаемым стандартам эмиссии, необходимо рассмотреть различные стратегии использования катализаторов. Первый метод состоит в увеличении содержания благородного металла в катализаторе, а также возможном увеличении объема катализатора. По второму способу следует использовать трехмаршрутные катализаторы, близко присоединенные к коллектору двигателя для обеспечения лучших характеристики зажигания. Третий – в использовании стартового (пускового) катализатора вблизи коллектора, соединенного с катализатором. Возможно также использование традиционной каталитической технологии с применением улучшенных составов катализаторов.

Основная часть. *Разработка каталитически активного наноматериала для очистки отработавших газов мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания.* Был разработан каталитически активный композиционный наноматериал для низкотемпературной очистки отработавших газов от CO без содержания драгоценных металлов. Следует отметить, что наиболее очевидный (и самый дорогой) метод, удовлетворяющий более строгим стандартам по CN и NO_x, состоит в увеличении благородного металла в катализаторе, поэтому предложенный подход является актуальным. При этом необходимым условием получения суспензии с максимально возможным равномерным распределением составляющих ее компонентов является высокая дисперсность последних. С целью выбора наиболее подходящей для этой цели соли меди в Институте физико-органической химии НАН Беларуси были проведены эксперименты по нанесению на никелевый пеноблок составов, состоящих:

- из меди (II) азотнокислой основной (Cu(NO₃)₂, Cu(OH)₂);
- меди (II) углекислой основной (малахита, CuCO₃, Cu(OH)₂);
- оксида меди, полученного разложением меди азотнокислой основной и, соответственно, отходов церита, бентонита и оксида алюминия.

Уже на стадии приготовления суспензий было видно, что малахит не следует брать в качестве источника оксида меди, поскольку он, несмотря на свою хорошую сыпучесть, имеет недостаточно высокую дисперсность. Вследствие большой плотности его частички опускались на дно стакана, и равномерную суспензию получить не удавалось. Наиболее подходящим исходным соединением меди для получения суспензии с равномерным распределением компонентов является азотнокислая медь основная.

Основываясь на данных выполненных исследований [2], при выборе количественных соотношений компонентов в суспензии остановились на таком, который позволял получать на никелевом блоке после прокалики вторичный (каталитический) слой следующего состава: Cu – 20%, отходы церита – 20%, Al₂O₃ – 35%, бентонит – 25%.

С целью изучения химических взаимодействий, имеющих место в каталитическом слое и ответственных за формирование активной поверхности катализатора, было синтезировано 7 образцов, состоящих из азотнокислой меди основной, отходов церита, оксида алюминия и бентонита с различным соотношением компонентов, а также двойные составы: азотнокислой меди двойной и оксида алюминия; азотнокислой меди основной и отходов церита; азотнокислой меди основной и бентонита.

Последние три смеси были прокалены при 760–780°C, первые же три образца прокаливали соответственно при 600, 700 и 780 °С. Полученные образцы исследовали методом рентгенофазного анализа (РФА) на приборе ДРОН-3 на медном излучении с хроматором и методом электронной спектроскопии диффузного отражения (таблицы 1–3).

Таблица 1. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 600 °С на воздухе

№ п/п	2 θ	θ	α , Å	I, %	Фазовый состав
1	21,6	10,80	4,10	17	Бентонит
2	28,1	14,05	3,17	100	CeO ₂ , бентонит
3	32,9	16,45	2,71	62	
4	35,3	17,65	2,54	65	CuO, бентонит
5	38,6	19,30	2,33	72	CuO
6	47,2	23,60	1,92	10	
7	53,4	26,70	1,71	7	CuO
8	56,3	28,15	1,63	90	
9	58,0	29,00	1,59	8	CuO
10	59,0	29,50	1,56	15	
11	61,4	30,07	1,51	16	CuO
12	66,1	33,05	1,41	7	CuO, Al ₂ O ₃
13	67,6	33,80	1,382	10	Al ₂ O ₃
14	69,2	34,60	1,354	18	CeO ₂
15	75,0	37,50	1,260	8	CuO
16	76,7	38,35	1,239	29	CeO ₂
17	79,0	38,50	1,208	23	
18	88,3	44,15	1,103	27	CeO ₂
19	95,2	46,10	1,041	26	CeO ₂
20	107,2	53,60	0,955	11	

Таблица 2. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 700 °С на воздухе

№/п/п	2 θ	θ	α , Å	I, %	Фазовый состав
1	21,2	10,60	4,18	8	Бентонит
2	28,4	14,20	3,13	100	CeO ₂
3	32,7	16,35	2,73	28	CeO ₂
4	35,2	17,60	2,54	25	CuO
5	38,4	19,20	2,34	24	CuO
6	47,0	23,50	1,93	59	CeO ₂
7	48,5	24,25	1,87	5	CuO
8	53,2	26,60	1,72	2	
9	56,0	28,00	1,64	41	CeO ₂
10	58,6	29,30	1,57	8	CeO ₂
11	61,4	30,70	1,505	5	
12	65,7	32,90	1,417	7	CuO
13	67,5	33,80	1,384	5	CuO
14	69,2	34,60	1,354	8	CeO ₂
15	76,4	38,20	1,243	12	CeO ₂
16	78,8	39,90	1,198	9	
17	88,2	44,10	1,105	14	CeO ₂
18	95,2	47,60	1,041	13	CeO ₂
19	107,4	53,60	0,955	5	CeO ₂

Таблица 3. – Данные РФА вторичного каталитического слоя после его термообработки при 800 °С на воздухе

№/п/п	2θ	θ	α, Å	I, %	Фазовый состав
1	21,2	10,60	4,18	12	Бентонит
2	28,2	14,10	3,17	100	CeO ₂
3	31,0	15,50	2,86	14	CeO ₂
4	32,5	16,20	2,75	25	
5	36,5	18,20	2,45	32	
6	44,6	22,30	2,03	8	
7	47,2	23,60	1,92	55	CeO ₂
8	55,9	27,90	1,64	44	CeO ₂
9	59,0	29,50	1,56	15	
10	65,0	32,50	1,431	18	
11	76,4	38,20	1,243	13	CeO ₂
12	79,0	39,50	1,208	10	CeO ₂
13	88,0	44,00	1,107	14	CeO ₂
14	95,2	47,60	1,041	12	CeO ₂
15	107,4	53,70	0,954	5	

Из сопоставления рентгенограмм следует, что уже при прокаливании при 600 °С начинается взаимодействие между оксидами меди и алюминия, которое существенно усиливается при прокаливании при более высоких температурах. На рентгенограммах регистрируются рефлексы от CeO₂ и бентонита, а также неидентифицированного соединения (800 °С). Неидентифицированным соединением, вероятнее всего, является медноалюминиевая шпинель. Этот вывод подтверждают и спектры диффузного отражения (рисунок 1) образца, имеющего состав, указанный выше, после его прокаливания при 800 °С (кривая 1) и смеси азотнокислой основной после термообработки при 780 °С (кривая 2). Спектры отражения образцов близки между собой, что свидетельствует об одинаковом электронном состоянии ионов меди в обоих образцах. Значительные количества меди в рассматриваемых образцах обусловили недостаточную разрешаемость полос поглощения.

Поэтому на экспериментальный образец каталитического блока (3 штуки) был нанесен следующий состав (масс. %): Cu – 45, отходы церита – 10, Al₂O₃ – 20, бентонит – 25.

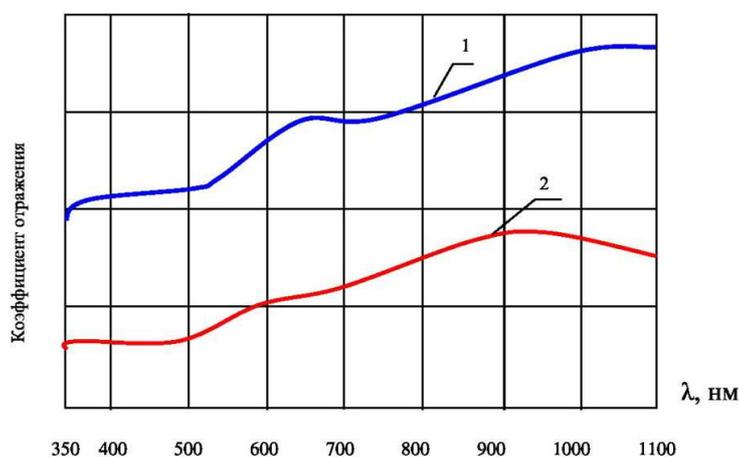


Рисунок 1. – Спектры диффузного отражения образца, соответствующего по составу вторичному слою, после его прокаливания при 800 °С (1) и смеси, состоящей из азотнокислой меди основной и оксида алюминия, после термообработки при 780 °С (2)

Таким образом, поверхностный каталитический слой на никелевых блоках состоит из CeO₂, алюмосиликата и медноалюмоникелевой шпинели. Возможно, протекают и другие твердофазные реакции с образованием новых химических образований, однако для более глубокого изучения этих реакций необходимо проведение исследований методами ИК- и ЭПР-спектроскопии.

По описанной выше технологии были синтезированы три образца оксидных медноцериевых катализаторов на подложке из дробленого пористого никеля, имеющего следующие составы (масс. %):

- 1,0 – CuO; 5,5 – Al₂O₃; 1,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер};
- 2,0 – CuO; 3,5 – Al₂O₃; 2,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер};
- 2,0 – CuO; 4,5 – Al₂O₃; 1,0 – отходы церита; 2,5 – алюмосиликат; 90 – Ni_{мер}.

Все образцы на воздухе были прокалены (800 °С) и испытаны (таблица 4). Как видно, катализаторы испытывались в достаточно жестких условиях на газовых составах с высоким содержанием СО (3,54–8,28 об. %) и циклогексана (0,36–0,43 об. %) и на объемных скоростях, превышающих 10 000 ч⁻¹.

Таблица 4. – Результаты исследования оксидных медноцериевых на пористом никеле катализаторов в процессе окисления монооксида углерода, циклогексана и их смеси кислородно-азотной смесью

Объемная скорость газового потока – 11 250 м³/ч. Температура прокалики образцов на воздухе 800 °С.

Температура в реакторе, °С	Состав газовой смеси, % об.										Конверсия, %	
	на входе в реактор				на выходе из реактора							
	O ₂	N ₂	CO	C ₆ H ₁₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	C ₆ H ₁₂	CO	C ₆ H ₁₂	
Образец 1												
400	19,56	74,72	5,72	–	17,13	78,38	4,14	0,38	–	93,4	–	
480	17,64	73,66	8,28	0,42	15,49	77,83	5,16	1,25	0,27	85,0	35,7	
500	20,77	78,86	–	0,37	15,82	82,19	1,90	–	0,04	–	89,2	
Образец 2												
400	18,91	75,18	5,91	–	16,9	79,12	3,97	0,01	–	99,83	–	
410	17,84	75,75	6,44	–	16,44	78,78	4,78	–	–	100,0	–	
402	17,84	77,67	4,12	0,37	15,38	79,54	4,67	0,25	0,16	93,9	56,8	
405	18,80	74,05	6,78	0,37	14,14	78,30	6,68	0,68	0,20	90,0	46,0	
400	19,25	80,37	–	0,38	18,65	80,47	0,62	–	0,26	–	31,6	
500	19,51	80,15	–	0,37	16,10	81,58	2,28	–	0,04	–	88,2	
Образец 3												
403	20,59	75,87	3,54	–	18,46	78,37	3,12	0,05	–	98,6	–	
406	19,80	72,46	7,36	0,38	14,65	79,40	5,67	0,16	0,12	97,8	68,4	
500	18,29	81,28	–	0,43	16,82	80,94	2,21	–	0,03	–	93,5	

Анализ данных показывает, что циклогексан как один из трудноокисляемых соединений превращается в диоксид углерода на 8–93% при 500 °С. Монооксид углерода сгорает полностью при температуре 400 °С (на используемой каталитической установке изучение процесса окисления газовых смесей при более низких температурах не предусмотрено).

Сопоставление полученных значений с данными научных публикаций для такого известного катализатора очистки отработавших газов от СО, как меднооксидный¹, позволяет считать каталитический состав даже при столь малом содержании активного компонента существенно более активным.

Тем не менее, учитывая необходимость, с одной стороны, не увеличить существенно динамическое сопротивление потоку газов при насаивании на носитель из пористого никеля вторичного слоя, с другой – увеличить активность вторичного (каталитического) слоя при получении опытной партии катализатора, и исходя из представленных результатов испытаний, во вторичном слое надо было увеличить содержание активных компонентов не менее, чем вдвое, сохранив содержание алюмосиликата на том же уровне.

Разработка конструкции каталитического блока для очистки отработавших газов мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания. Исследования были выполнены на блоках двух типов (из пеноникеля и из двух слоев фольги). При этом вследствие значительной плотности пеноникеля особый интерес представляет именно конструкция блока на основе металлической фольги. Такие конструкции известны, причем наиболее близким к предлагаемой конструкции по технической сущности является каталитический блок, образованный чередующимися плоскими и рифлеными металлическими полосами, которые образуют каналы сквозного протекания газа, проходящие через подложку в осевом направлении². Охватывающая подложку оболочка изготовлена из листа, толщина которого равна толщине плоских и рифленых металлических полос или незначительно превосходит ее.

Однако такое исполнение нейтрализатора отработавших газов ДВС не позволяет организовать процесс очистки отработавших газов максимально эффективно, поскольку практически полностью исключает явление турбулентности при прохождении через него отработавших газов. Кроме того, незначительно отличающаяся толщина стенок каналов и охватывающей их оболочки при малой толщине применяемого обычно металлического листа (порядка 20 мкм) и больших объемных скоростях, создаваемых современными двигателями внутреннего сгорания, может отрицательно сказаться на жесткости, а значит, и долговечности конструкции нейтрализатора.

Решение поставленной задачи достигается в нейтрализаторе для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания, содержащем корпус с входным и выходным патрубками и каталитический блок, образованный плоскими и гофрированными металлическими полосами, тем, что в плоских металлических полосах выполнена перфорация. При этом в целях повышения жесткости конструкции нейтрализатора охватывающая каталитиче-

¹ Катализатор АОК-78-52 ЛОС // СКТБ «Катализатор». URL: <https://www.katcom.ru/tehnologii-i-materialy/promyshlennaya-ekologiya/kataliticheskoe-okislenie-los-i-so/katalizator-aok-78-52/>

² Носитель катализатора на основе металла (варианты) и способ его приготовления (варианты): пат. RU 2234978С1 / С.Ф. Тихов, В.А. Садыков, В.Ю. Ульяницкий, С.Н. Павлова, О.И. Снегуренко. – Оpubл. 27.08.2004.

ский блок металлическая оболочка изготовлена из листа, толщину которой целесообразно выбрать в 5...8 раз превышающей толщину плоских и рифленых полос (рисунок 2).

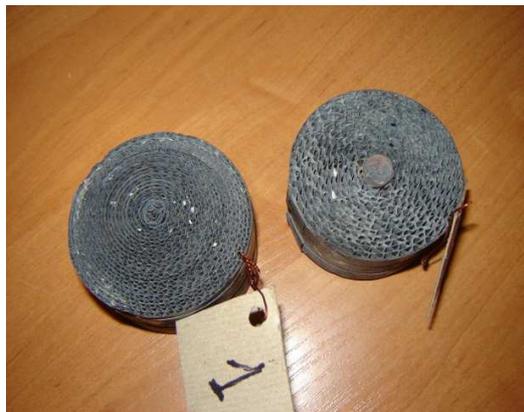


Рисунок 2. – Каталитические блоки для мотоциклетного двигателя, изготовленные из металлической фольги

Такое исполнение нейтрализатора отработавших газов ДВС позволяет организовать турбулентность при протекании через него отработавших газов, а, следовательно, увеличить и эффективность их очистки от вредных примесей. При этом наличие жесткой оболочки, особенно при малой толщине применяемой при изготовлении нейтрализатора металлической фольги и больших объемных скоростях, создаваемых современными двигателями внутреннего сгорания, положительно скажется на его долговечности.

Нейтрализатор работает следующим образом. При попадании отработавших газов через входной патрубок в нейтрализатор часть газовых потоков пройдет по сквозным каналам, образованным плоскими перфорированными и рифлеными сплошными металлическими полосами. Однако часть потоков, будучи направленной через перфорацию в сплошных металлических полосах, образует турбулентное газовое течение, что повысит степень очистки отработавших газов от вредных примесей. Турбулентный газовый поток после очистки в каталитическом блоке выходит из нейтрализатора через выходной патрубок.

Разработанная каталитическая композиция наносилась уже на изготовленный блок при непрерывной его продувке, т.к. при предварительном нанесении катализатора на металлическую фольгу и последующем ее свертывании возможно осыпание слоя Al_2O_3 с нанесенным катализатором.

Измерение концентрации окиси углерода (CO) в отработавших газах выполнялись на мотоцикле ММВЗ-3.114:

- с серийной выпускной системой и предложенной системой подачи воздуха в выхлопную трубу;
- с выпускной системой, оборудованной экспериментальным катализатором и системой подачи воздуха в выхлопную трубу (рисунок 3).

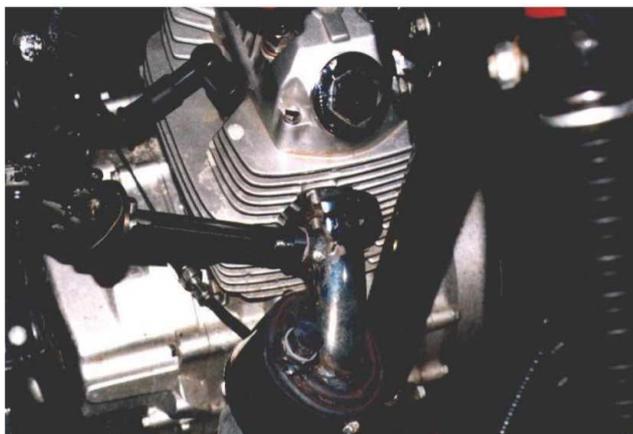


Рисунок 3. – Мотоцикл с выпускной системой, оборудованной экспериментальным нейтрализатором и системой подачи воздуха в выпускную трубу

На испытания были представлены два варианта сотовых катализаторов со следующими геометрическими размерами: диаметр $\varnothing 60$ мм, длина L 60. Катализаторы условно помечены: № 1 – с мелкой ячейкой; № 2 – с крупной ячейкой.

Испытания проводились поочередно с двумя вариантами катализатора (см. рисунок 3). Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Сравнительные замеры содержания СО и СН в отработавших газах бензинового двигателя, установленного на мотоцикле ММВЗ-3.114

Выпускная система, оборудованная экспериментальным катализатором и системой подачи воздуха в выхлопную трубу						Выпускная система с подачей дополнительного воздуха в выпускной трубопровод			Серийная выпускная система		
Катализатор № 1			Катализатор № 2								
<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана	<i>n</i> , об/мин	СО, %	СН, ppm концентрации гексана
1000	0,00	001	1050	0,24	000	Замер не проводился			Замер не проводился		
1600	0,16	001	1580	0,27	000	1600	1,2	137	1600	2,1	138
1880	0,16	001	2130	0,63	000	2100	2,1	151	2100	3,5	151
2550	0,30	001	2670	0,86	000	2500	2,5	258	2500	3,75	278
3050	0,60	001	3130	1,07	000	Замер не проводился			Замер не проводился		

При этом установлено, что установка каталитического блока в комплексе с системой подачи воздуха в выпускной трубопровод мотоцикла позволяет добиться значительного снижения концентрации СО и СН в отработавших газах двигателя.

Незначительное увеличение концентрации СО образца № 2 в сравнении с образцом № 1 обусловлено более крупной ячейкой каталитического блока № 2.

Заключение. Проведенные исследования показывают, что применение катализатора в комплексе с системой подачи воздуха позволяет добиться значительного снижения концентрации СО в отработавших газах двигателя мотоцикла. Для уточнения функциональных возможностей комплекса катализатор – система подачи воздуха необходимо провести дополнительные испытания с применением обратных клапанов системы подачи воздуха различного проходного сечения или принудительной подачи воздуха в выпускной тракт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Н.М. Катализаторы очистки газовых выбросов промышленных производств. – Алма-Ата: Наука, Каз. ССР, 1991. – 176 с.
2. Янкевич Н.С., Климук А.С., Кравчук Л.С. Снижение содержания вредных примесей в отработавших газах ДВС // Двигателестроение. – 2006. – № 1. – С. 35–37.

REFERENCES

1. Popova, N.M. (1991). *Katalizatory ochistki gazovykh vybrosov promyshlennykh proizvodstv*. Alma-Ata: Nauka, Kaz. SSR. (In Russ.).
2. Yankevich, N.S., Klimuk, A.S. & Kravchuk, L.S. (2006). Snizhenie sodержaniya vrednykh primesei v otrabotavshikh gazakh DVS. *Dvigatelistroenie*, (1), 35–37. (In Russ.).

Поступила 20.01.2025

EXHAUST GAS CLEANING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE MANUFACTURED BY JSC “MOTOVELO”

N. YANKEVICH

*(Center for System Analysis and Strategic Research
of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)*

S. YANKEVICH

(Public Corporation “MotoVelo”, Minsk)

Currently, catalytic afterburning is considered to be the most versatile method for reducing harmful impurities in exhaust gases. There are known catalytic systems for burning all regulated components or their combinations (three-way catalysts). However, the issue of developing new design and technological solutions remains relevant due to the fact that the application of a standard system on a specific internal combustion engine usually involves several difficulties.

The article discusses research on the development of a catalytic converter for gasoline motorcycle engines.

Keywords: catalytic cleaning, catalyst, carrier, internal combustion engine.