

## СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-45-53  
УДК 621.43.068.4:629.5

Г.В. Медведев, Н.Н. Горлова  
Алтайский государственный технический университет, Барнаул, Россия

### ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

**Объект и цель научной работы.** Объектом работы являются отработавшие газы судовых энергетических установок. Цель исследования – выявление зависимости эксплуатационных и функциональных свойств каталитического нейтрализатора от компоновки и режима работы двигателя.

**Материалы и методы.** Рассмотрены особенности использования метода каталитической нейтрализации на основе пористых проницаемых каталитических материалов с целью снижения токсичности отработавших газов.

**Основные результаты.** Было установлено, что противодействие, создаваемое СВС-фильтром, зависит от количества ступеней очистки СВС-фильтра (самораспространяющийся высокотемпературный синтез) и оборотов коленчатого вала дизеля. Выполнено сравнительное испытание вариантов компоновки каталитического нейтрализатора, обеспечения одно-, двух- и трехступенчатой очистки фильтрующими пористыми проницаемыми СВС-блоками отработавших газов от твердых частиц сажи судовой энергетической установки (СЭУ) по внешней скоростной характеристике дизеля 3Д6 (6Ч 15/18).

**Заключение.** Получены экспериментальные данные, которые дают представление о перспективах применения и возможностях развития конструкций каталитических нейтрализаторов для очистки отработавших газов дизельных СЭУ на основе пористых СВС-материалов.

**Ключевые слова:** дизель, катализаторы, отработавшие газы, очистка, противодействие, твердые частицы, энергетическая установка.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-45-53  
UDC 621.43.068.4:629.5

G. Medvedev, N. Gorlova  
Altay State Technical University, Barnaul, Russia

### PECULIARITIES OF EXHAUST GAS TREATMENT FOR MARINE POWER PLANTS BY POROUS PERMEABLE CATALYSTS

**Object and purpose of research.** This paper discusses exhaust gases of marine power plants to understand how performance and functionality of a catalytic neutralizer depend on the configuration and operational conditions of engine.

**Materials and methods.** This paper discusses catalytic neutralization peculiarities of exhaust gases by porous permeable catalysts to mitigate the toxicity of emissions.

---

*Для цитирования:* Медведев Г.В., Горлова Н.Н. Особенности очистки отработавших газов судовых энергетических установок в пористых проницаемых каталитических материалах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 45–53.

*For citations:* Medvedev G., Gorlova N. Peculiarities of exhaust gas treatment for marine power plants by porous permeable catalysts. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 45–53 (in Russian).

**Main results.** It was found that the counter-pressure of a self-propagating high-temperature synthesis (SHS) filter depends on the number of its treatment stages and on diesel RPM. Comparative tests were performed for different configurations of catalytic neutralizers (one, two and three stages of exhaust gas treatment by porous permeable SHS filters) removing solid carbon particles from the emissions of a 3D6 (6Ch 15/18) diesels with different full-load curves.

**Conclusion.** The test data outline design prospects and possible applications of catalytic neutralizers for treatment of marine diesel exhausts by porous SHS materials.

**Keywords:** diesel, catalysts, exhaust gases, treatment, counter-pressure, solid particles, power plant.

*Authors declare lack of the possible conflicts of interests.*

## Введение

### Introduction

В последние десятилетия в практике эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) интенсивно используется метод каталитической нейтрализации отработавших газов (ОГ). Стратегическим направлением решения проблемы загрязнения окружающей среды вредными выбросами предприятий и транспорта в выступает разработка новых каталитических материалов для очистки ОГ.

Внутренняя структура катализатора может быть выполнена из керамики или металла. Керамические катализаторы дешевле и поэтому более распространены. Однако керамический катализатор довольно хрупок. Катализатор, нанесенный на металлический носитель, надежнее, но подвержен коррозии и имеет относительно небольшую удельную поверхность. Насыпной шариковый катализатор с точки зрения фильтрации не является полнопоточным. Пористый проницаемый металлокерамический каталитический материал, полученный самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС), лишен этих недостатков, и обладает их достоинствами.

Преимущества технологии СВС состоят в безотходности, малой энергоемкости, возможности повторного применения и использования отходов машиностроительных производств и металлургии, а также в возможности обеспечения заданных свойств материалов.

Современные системы SCR (Selective Catalytic Reduction) – каталитической нейтрализации ОГ судовых дизелей – являются технологически сложными устройствами, и по компоновочным соображениям или из-за возникшей потребности в модернизации судна не всегда удается разместить их как можно ближе к СЭУ [1, 2]. Это влечет за собой падение температуры ОГ по пути выпускного тракта до реактора системы каталитической нейтрализации и, как следствие, снижение расчетной эффективности очистки ОГ от вредных веществ [3].

В настоящее время созданы методики, которые позволяют проектировать и моделировать процессы, происходящие в каталитических нейтрализаторах для дизелей, на различных носителях [4]. Это актуально и для подбора типа и материала катализатора [5]. Однако существует особенность испытаний катализаторов на эффективность очистки ОГ, которая заключается в том, что при испытании используют газовые смеси, а не реальные газы. Также для оценки эффективности работы каталитического материала на стендовых испытаниях их догревают до эффективных рабочих температур катализатора, что в корне не соответствует реальным условиям работы катализатора на силовой установке.

Согласно методике [6], для определения противодавления, создаваемого каталитическим блоком или насыпным шариковым катализатором, в расчете учитывают не только удельную поверхность нейтрализатора, но и его пористость. Однако насыпной шариковый катализатор не обладает таким свойством, как полнопоточность очистки ОГ, т.к. между частицами шарообразной формы присутствуют промежутки, через которые ОГ будут обтекать катализатор; соответственно, каталитическая очистка будет осуществляться по поверхности катализатора, а не в его порах. Это существенно искажает заявленную эффективность работы катализатора, в том числе и по очистке от твердых частиц, при обеспечении требований по создаваемым противодавлениям.

## Постановка задачи

### Formulation of task

Цель исследования состоит в выявлении зависимости эксплуатационных и функциональных свойств каталитического нейтрализатора от компоновки и режима работы двигателя. Для этого необходимо проанализировать процессы течения ОГ через стенку пористого проницаемого каталитического металлокерамического фильтра в нейтрализаторах системы выпуска отработавших газов СЭУ, а также описать полученные зависимости математическими уравне-

ниями, ранее не опубликованными в литературе, для изучения особенности процесса фильтрации и оценки качества очистки ОГ от твердых частиц.

Особенность процесса фильтрации твердых частиц сажи при сгорании дизельного топлива в пористых проницаемых металлокерамических фильтрах заключается в изменении состояния газов, доокислении газообразных продуктов неполного сгорания дизельного топлива, выгорании твердых частиц сажи, осажденных на поверхности фильтра, поглощении твердых частиц пористым фильтрующим материалом с гротовыми (не сквозными) порами.

Отработавшие газы СЭУ при прохождении через каталитический нейтрализатор с металлокерамическими фильтрующими блоками, в зависимости от схемы течения газов в реакторе нейтрализатора, могут иметь два режима:

- область очень тонкого слоя по поверхности пористого проницаемого материала, так называемого пристеночного или пограничного слоя. В этом случае преобладает трение, которое хорошо описывается уравнением динамики для вязкого вещества, согласно которому градиент скорости в направлении движения вдоль пористой стенки фильтрующего элемента меняется, минимален у края поверхности стенки и равен

скорости потока при движении в зоне ламинарного течения вдоль оси фильтра;

- область течения вне пристеночного слоя. В этом случае силы трения малы и не являются преобладающими; для описания режима движения применяются уравнения для идеальной жидкости.

Следует уточнить, что до середины XX века изучение процесса очистки ОГ дизельного топлива в каталитических нейтрализаторах осуществлялось только эмпирическим путем с использованием модели так называемого «черного ящика» или поправочных коэффициентов. В арсенале исследователей отсутствуют как общепринятые методы и методики расчетов каталитических нейтрализаторов, так и математические модели с упорядоченной структурой, которые также бы объединить в один элемент двигатель и систему очистки.

## Описание решения задачи

### Description of solution

На рис. 1 приведена разработанная структурная схема взаимодействия процессов в системе «двигатель – система очистки», которая показывает влияние работы системы очистки на работу двигателя.

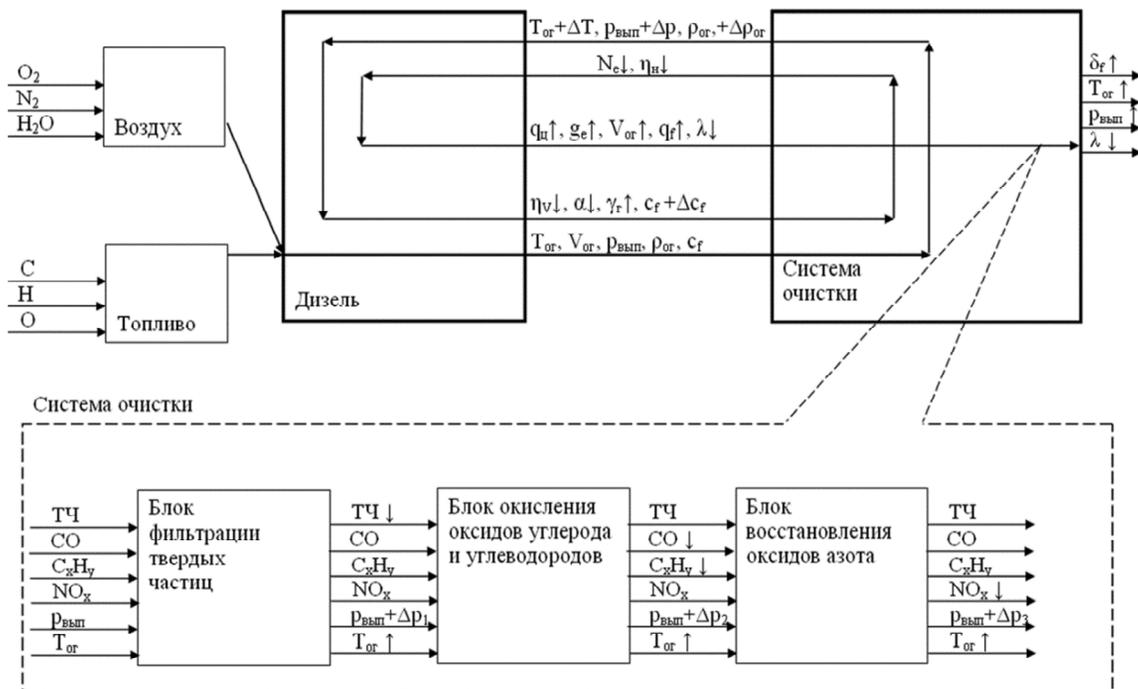
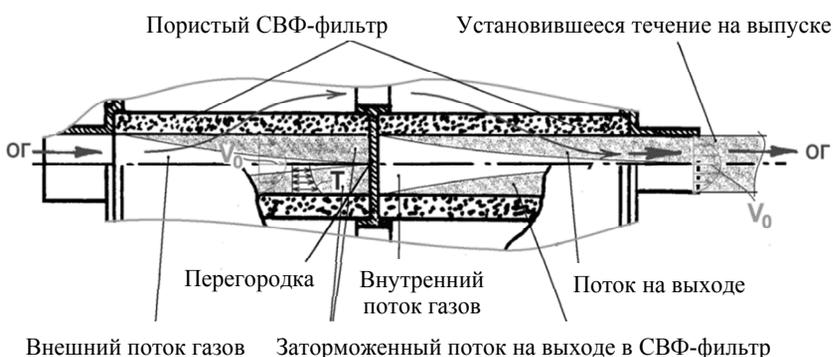


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия процессов в системе «двигатель – система очистки»

Fig. 1. Flow chart of interaction processes in "engine-treatment unit" system



**Рис. 2.** Схема течения газов через стенку пористого проницаемого СВС-каталитического фильтра нейтрализатора отработавших газов в системе выпуска дизельной судовой энергетической установки [11]

**Fig. 2.** Exhaust gas passage via the wall of a porous permeable catalytic SHS filter in the exhaust treatment system of a marine diesel [11]

Сохранение приемлемого противодавления на выпуске является одним из условий эффективной каталитической очистки ОГ при обеспечении топливной экономичности на приемлемом уровне и сохранении допустимого противодавления создаваемой системой выпуска с установленной системой SCR-нейтрализации [7, 8]. Особенностью работы многоступенчатой системы каталитической нейтрализации селективного действия является решение краугольной задачи о времени пребывания потока ОГ в объеме пористого проницаемого СВС-каталитического материала при их взаимном контакте с каталитическим материалом и при обеспечении максимальной удельной поровой поверхности последнего, а также ограниченных габаритах фильтрующих блоков [9, 10].

Схема течения газов через стенку пористого проницаемого СВС-каталитического фильтра нейтрализатора ОГ дизельной СЭУ представлена на рис. 2 [11]. Отличительной чертой прохождения потока ОГ через стенку пористого проницаемого металлокерамического СВС-материала является то, что он постоянно изменяет вектор скорости, огибая соединительные узлы интерметаллидного каркаса, двигаясь по сквозным и «гротовым» порам. Поэтому процесс фильтрации твердых частиц, находящихся в ОГ, зависит и от размера частицы, и от ее формы. В связи с этим будет иметь место следующая очередность:

- на предварительном этапе отделившиеся от основного потока отработавших газов твердые частицы приближаются к поверхности фильтра под действием инерционных сил при изменении направления основного потока ОГ;
- на следующем этапе твердые частицы дизельного топлива непосредственно примыкают к поверхности фильтра за счет своей геометрической формы;

- особенность заключающего этапа: твердые частицы, вне зависимости от их размера, не проходят через «гротовые» поры, задерживаются в них и доокисляются. Твердые частицы меньше диаметра поры проходят через сквозную пору, при этом частично доокисляясь. Твердые частицы больше диаметра поры материала задерживаются на поверхности и впоследствии доокисляются. Те частицы, которые не пролетели через пористый проницаемый материал, создают временное дополнительное противодавление на выпуске и будут доокислены только после достижения ими температуры самовоспламенения по мере прогрева ОГ СЭУ или с применением специальных присадок (например, растворов солей церия) для снижения температуры самовоспламенения.

При этом следует отметить, что больший размер твердых частиц дизельного топлива, особенно вызванных неполным сгоранием, увеличивает вероятность их улавливания пористой проницаемой стенкой СВС-фильтра.

При описании процесса очистки ОГ СЭУ в трехступенчатом SCR-нейтрализаторе на основе пористого проницаемого материала, полученного по технологии СВС на основе окаины легированной стали, были приняты следующие положения и допущения [11, 12]:

- все три ступени реактора представляют собой пористые среды с индивидуальной пористостью, извилистостью и средним приведенным диаметром пор для каждой ступени. Химические процессы, протекающие по ступеням в реакторе нейтрализатора, осуществляются в пространстве и на поверхности пор;
- на специфику прохождения химических реакций в реакторе нейтрализатора в присутствии катализатора влияет среда ОГ;

- на скорость прямых и обратных химических реакций влияют концентрация реагирующих веществ, их агрегатное состояние, давление и температура в реакторе, а также присутствие катализатора.

## Результаты исследования

### Results

Выполнено сравнительное испытание вариантов компоновки каталитического нейтрализатора, обеспечение одно-, двух- и трехступенчатой очистки фильтрующими пористыми проницаемыми СВС-блоками ОГ от твердых частиц сажи СЭУ по внешней скоростной характеристике дизеля ЗДб (6Ч 15/18). Оценка содержания твердых частиц в ОГ (дымности) проводилась фильтрационным способом по ГОСТ Р 51250-99 с последующим вычислением степени очистки ОГ от твердых частиц.

Вариант с трехступенчатой схемой очистки приводит к росту противодавления на режиме полной мощности для СВС-блоков на основе окалины легированной стали, со средним приведенным диаметром пор 180 мкм, достигающих 6,5 кПа (допустимых при 5,9 кПа [11]). Однако при двухступенчатом варианте очистки противодавление находится на уровне 5,9 кПа, а при одноступенчатом – 5,1 кПа (рис. 3), что подтверждает необходимость оптимальной компоновки блоков с различным диаметром пор по ступеням нейтрализатора. При установке фильтрующих СВС-блоков в нейтрализатор отключаемые блоки заменялись металлическими втулками соответствующих размеров. Степень очистки ОГ СЭУ ЗДб от твердых частиц при трехступенчатой схеме сохраняется на уровне не менее 90 %, а при одноступенчатой схеме – не более 75 %.

Было установлено, что противодавление, создаваемое СВС-фильтром, и степень очистки от твердых частиц зависят от количества ступеней очистки СВС-фильтра и оборотов коленчатого вала дизеля. В результате обработки экспериментальных данных получена математическая зависимость, связывающая противодавление, создаваемое фильтром, и степень очистки от твердых частиц с числом ступеней очистки и оборотов коленчатого вала дизеля:

$$\Delta p_{\text{вып}} = 2,074 - 0,002447n - 0,332617n_{\text{ст}} + 0,000002n^2 + 0,107357n_{\text{ст}}^2 + 0,000292n \cdot n_{\text{ст}}, \text{ кПа}; (1)$$

$$\delta_{\text{тч}} = -28,598 + 0,087648n - 3,368260n_{\text{ст}} - 0,000020n^2 + 0,824891n_{\text{ст}}^2 + 0,004162n \cdot n_{\text{ст}}, \%, (2)$$

где  $n$  – обороты коленчатого вала дизеля, об/мин;  $n_{\text{ст}}$  – число ступеней очистки, шт.

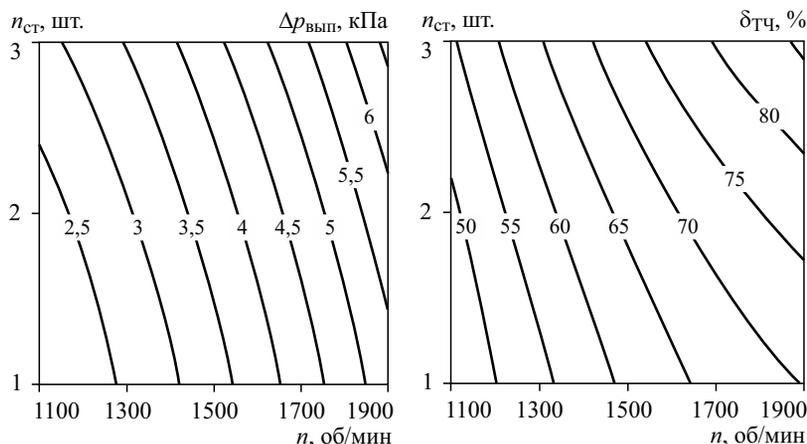
Выявленные зависимости (1) и (2) были описаны методом наименьших квадратов, со степенью достоверности аппроксимации 0,98.

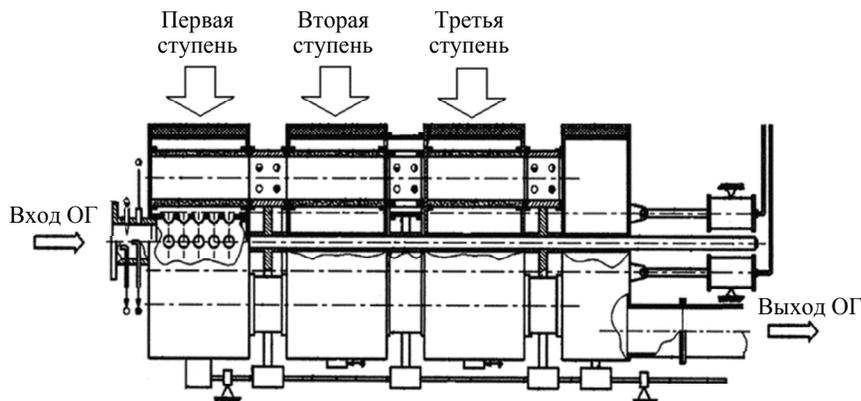
В соответствии с требованиями к системам выпуска ОГ допустимые создаваемые противодавления на выпуске не должны превышать 5,9 кПа, что, в свою очередь, подтверждает необходимость рациональной компоновки каталитических блоков по ступеням нейтрализатора для обеспечения приемлемого противодавления, создаваемого системой нейтрализации.

Особенность фильтрации твердых частиц дизельного топлива, содержащихся в ОГ, пористыми проницаемыми каталитическими блоками заключается в том, что она практически не зависит от тем-

**Рис. 3.** Зависимость противодавления, создаваемого фильтром, и степени очистки от твердых частиц от количества ступеней очистки СВС-фильтрами и оборотов коленчатого вала дизеля

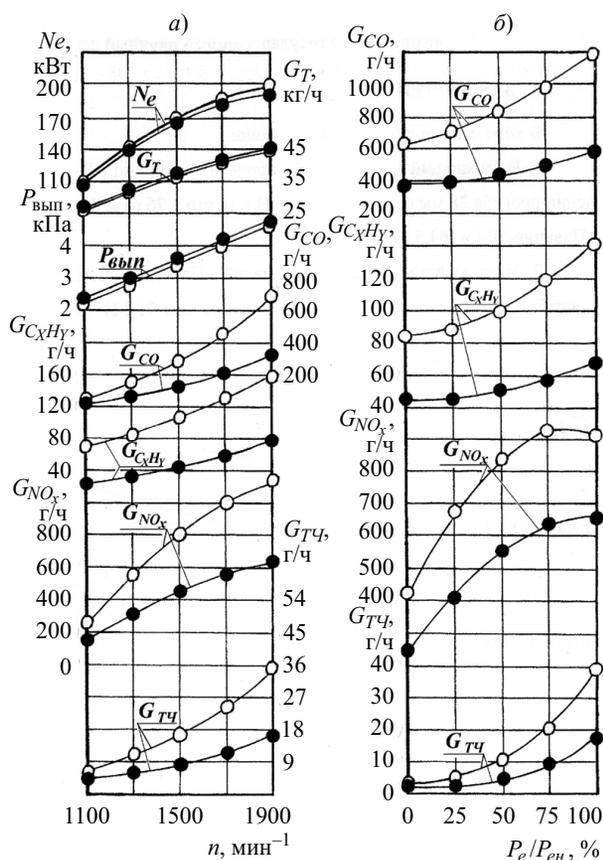
**Fig. 3.** Filter counter-pressure and quality of solid-particle removal by SHS filters versus the number of treatment stages and diesel RPM





**Рис. 4.** Общий вид установки для испытаний кассетного нейтрализатора отработавших газов двигателя внутреннего сгорания [13]

**Fig. 4.** General view of the test rig for a cassette-based neutralizer of an internal combustion engine exhausts [13]



**Рис. 5.** Эффективность каталитической очистки отработавших газов судового дизеля 6Ч 15/18: а) по внешней скоростной характеристике; б) по нагрузочной характеристике при 1900 мин<sup>-1</sup>; ○ – без каталитического нейтрализатора; ● – с каталитическим нейтрализатором

**Fig. 5.** Efficiency of catalytic exhaust treatment for a 6Ch 15/18 marine diesel in terms of а) full-load curve б) 1900 RPM curve; ○ – without catalyst; ● – with catalyst

пературы ОГ и покомпонентного состава материала, но зависит только от физических характеристик СВС-материала, таких как пористость, извилистость и средний приведенный диаметр пор.

## Описание установки

### Description of test rig

Установка для испытаний кассетного нейтрализатора ОГ ДВС (рис. 4) по патенту РФ № 2511833 [13] позволила в рамках предварительных экспериментов подобрать катализатор и определить состав шихты СВС-материала [11]. Запатентованная установка револьверной конструкции дает возможность с одной установки каталитических блоков производить сравнительные испытания материалов с 216 комбинационными вариантами расположения для трехступенчатых нейтрализаторов ОГ ДВС.

На рис. 5 представлены результаты испытаний СЭУ 3Д6 (6Ч 15/18) и очистки ОГ в СВС-каталитических блоках трехступенчатого нейтрализатора, содержащего блок фильтрации твердых частиц, блок окисления и блок восстановления, на основе СВС-материала медно-хромо-кислого состава и окалины легированной стали [14]. Данные о составах шихты, характеристиках и свойствах СВС-каталитических материалов на основе окалины легированной стали приведены в таблице [15].

Испытания СВС-фильтров очистки ОГ проводились на моторной установке, оборудованной согласно ГОСТ 30574-98, ГОСТ 24028-2013, ГОСТ 31967-2012 на судовые двигатели. Обработка данных исследования вредных веществ и дымности ОГ судовых дизелей проводилась с использованием циклов испытаний, соответствующих назначению дизеля, согласно ГОСТ 30574-98. Испытания выполнялись в стендовых условиях. Оценка погрешностей

Данные о составах шихты, характеристиках и свойствах СВС-каталитического материала на основе окалина легированной стали

Bed compositions, parameters and properties of a steel alloy-scale SHS catalyst

Отдельные характеристики	Интервалы значений показателей свойств
Содержание компонентов шихты, в процентах по массе	
Окалина легированной стали (18ХНВА, 18ХНМА, 40ХНМА и др.)	42,50–52,50
Оксиды формовочной глины	–
Оксид хрома	18,00
Хром	6,7–6,90
Никель	12,40
Алюминий	8,10–17,90
Иридий	0,20
Родий	0,10
Медь	2,00
Физические характеристики	
Средний приведенный диаметр пор, мкм	112–177
Извилистость пор при $\delta_{cm} = 10$ мм	1,12–1,35
Удельная поверхность материала, м <sup>2</sup> /г	85–133
Пористость	0,29–0,47
Физико-механические свойства	
Механическая прочность при сжатии, МПа	6,7–13,8
Механическая прочность при изгибе, МПа	2,9–3,7
Функциональные свойства материала при полной мощности дизеля и $T_{ог} = 593$ К	
Степень очистки от CO, %	80–85
Степень очистки от NO <sub>x</sub> , %	28–56
Степень очистки от C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , %	56–58
Степень очистки от ТЧ, %	90–92

измерений и расчетов при испытании СВС-каталитического материала производилась по методикам в соответствии с Правилем ЕЭК ООН N 24, Правилем ЕЭК ООН N 49 и ГОСТ 17.2.3.01-86.

Следует подчеркнуть, что наибольшая каталитическая эффективность очистки ОГ от основных компонентов проявляется при увеличении частоты вращения коленчатого вала и при этом роста температуры отработавших газов. По нагрузочной характеристике вместе с  $P_e/P_{ен}$  возрастает и температура ОГ, а вместе с ней растет температура в реакторе нейтрализатора и эффективность последнего.

## Заключение

### Conclusion

Разработана структурная схема взаимодействия процессов в системе «двигатель – система очистки», выделены основные параметры, влияющие на работу СЭУ при установке каталитического нейтрализатора.

Рассмотрена схема течения газов через стенку пористого проницаемого СВС-каталитического фильтра нейтрализатора ОГ в системе выпуска дизельной СЭУ и описаны особенности очистки ОГ от твердых частиц в пористых проницаемых металлокерамических фильтрах.

Выявлены зависимости противодействия, создаваемого фильтром, и степени очистки от твердых частиц от количества ступеней очистки СВС-фильтрами и оборотов коленчатого вала дизеля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для обеспечения приемлемого противодействия и степени очистки от твердых частиц следует применять СВС-материал с наименьшим средним приведенным диаметром пор в первой ступени и большим средним приведенным диаметром на последующих ступенях для обеспечения внутреннего порового пространства материала.

Установлено, что применение каталитической нейтрализации ОГ СЭУ 6Ч15/18 приводит к снижению мощности на 4,6 %, увеличению часового расхода топлива на 2,3 %, при обеспечении очистки ОГ от оксидов азота – до 43,87 %, оксидов углерода – до 53,05 %, углеводородов – до 50,92 %, твердых частиц – до 53,58 % по внешней скоростной характеристике, от оксидов азота – до 27,87 %, оксидов углерода – до 50,70 %, углеводородов – до 51,65 %, твердых частиц – до 55,74 % по нагрузочной характеристике соответственно.

Таким образом, полученные экспериментальные данные дают представление о перспективах применения и возможностях развития конструкций каталитических нейтрализаторов для очистки ОГ дизельных СЭУ на основе пористых СВС-материалов.

## Библиографический список

1. Исследование параметров, влияющих на качество очистки отработавших газов дизелей / *Бразовский В.В.* [и др.] // Ползуновский вестник. 2012. № 3/1. С. 224–231.
2. *Herdzik J.* Emissions from marine engines versus IMO certification and requirements of Tier 3 // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011. Vol. 18, № 2. P. 161–167.
3. Untersuchung der Eigenschaften neuer Dieselpartikelfilter / *Boger T., Rose D., Cutler W.A.* [et al.] // MTZ=Motortechische Zeitschrift. 2005. Vol. 66, № 9. P. 660–669.
4. *Мельберг А.А.* Повышение экологической безопасности поршневых двигателей. Новосибирск: Наука, 2003. 170 с.
5. *Shyan L.C., Chun H.L.* Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 521. P. 101–111.
6. *Мельберг А.А., Новоселов А.А.* Каталитическая очистка отработавших газов поршневых двигателей. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017. 263 с.

7. *Телидис К.К.* Перспективные пути снижения вредных выбросов судовых дизелей с выпускными газами в атмосферу // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 160–165.
8. Технологии снижения выбросов NO<sub>x</sub> и частиц судовых дизелей (материалы конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. 2015. № 3. С. 34–52.
9. Porous SHS-materials based on iron oxide and aluminum with additions of alloying elements / *Kolomeets M.A.* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58, № 3. P. 293–298.
10. Porous Permeable SHS Cermets Based on Iron and Aluminum Oxides / *Novoselova T.V.* [et al.] // Russian Engineering Research. 2018. № 38. P. 182–188. DOI: 10.3103/S1068798X18030139.
11. *Медведев Г.В.* Металлокерамические фильтры очистки токсичных газов на транспорте. 2-е изд., стер. Новосибирск: Изд-во Сибирского гос. ун-та водного транспорта, 2017. 331 с.
12. *Медведев Г.В., Сеначин П.К.* Численное моделирование процесса очистки отработавших газов в трехзонном нейтрализаторе проточного типа // Совершенствование быстроходных двигателей: сборник докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Барнаул: АлтГТУ, 2018. С. 160–167.
13. Установка для испытаний кассетного нейтрализатора отработавших газов двигателя внутреннего сгорания: пат. 2511833 Рос. Федерация / *Боков К.С., Медведев Г.В., Печенникова Д.С., Новоселов А.Л., Новоселов А.А.* № 2012132961/06; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. 8 с.
14. Шихта с родием и иридием для получения пористого проницаемого каталитического материала: пат. 2530187 Рос. Федерация / *Горлова Н.Н., Новоселов А.Л., Медведев Г.В., Печенникова Д.С., Новоселов А.А.* № 2013139974/02; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28. 7 с.
15. *Камышов Ю.Н., Медведев Г.В., Горлова Н.Н.* Система очистки отработавших газов дизелей судовых энергетических установок на основе пористых проницаемых коррозионноустойчивых материалов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. вып. 2. С. 187–197.

## References

1. *V. Brazovsky et al.* Investigation of the parameters relevant for diesel exhaust treatment quality // *Polzunovsky Vestnik*. 2012. No. 3/1. P. 224–231 (in Russian).
2. *J. Herdzyk.* Emissions from marine engines versus IMO certification and requirements of Tier 3 // Journal of

- KONES Powertrain and Transport. 2011. Vol. 18. № 2. P. 161–167.
3. Untersuchung der Eigenschaften neuer Dieselpartikellifter / *T. Boger, D. Rose, W.A. Cutler* [et al.] // *MTZ=Motortechnische Zeitschrift*. 2005. Vol. 66. № 9. P. 660–669.
  4. *A. Melbert*. Improving eco-friendliness of piston engines. Novosibirsk: Nauka, 2003, 170 p. (*in Russian*).
  5. *L.C. Shyan, H.L. Chun*. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review // *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 521. P. 101–111.
  6. *A. Melbert, A. Novoselov*. Catalytic purification of piston engine exhaust gases. Barnaul: Publishing House of Altay State Technical University, 2017. 263 p. (*in Russian*).
  7. *K. Telidis*. Promising ways of mitigating poisonous atmospheric emissions of marine diesels // *Scientific Challenges in Transport of Siberia and the Far East*. 2015. No. 2. P. 160–165 (*in Russian*).
  8. Technologies of Reducing NOx and Particle Emission from Marine Diesel Engines (based on CIMAC 2013 papers) // *Dvigatelistroyeniye (Engine Building)*. 2015. No. 3. P. 34–52 (*in Russian*).
  9. Porous SHS-materials based on iron oxide and aluminum with additions of alloying elements / *M.A. Kolomeets* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 58, № 3. P. 293–298.
  10. Porous Permeable SHS Cermets Based on Iron and Aluminum Oxides / *T.V. Novoselova* [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2018. № 38. P. 182–188. DOI: 10.3103/S1068798X18030139.
  11. *G. Medvedev*. Metal-ceramic filters of toxic gases for transport. 2<sup>nd</sup> ed. (stereotype). Novosibirsk: Publishing House of Siberian State University of Water Transport, 2017. 331 p. (*in Russian*).
  12. *G. Medvedev, P. Senachin*. Numerical simulation of exhaust gas purification in flow-type three-zone neutralizer // *Advances in high-speed engines. Compendium of papers, Scientific & technical conference of students, post-graduates and professors of Internal Combustion Engines department*. Barnaul: Altay State Technical University, 2018. P. 160–167 (*in Russian*).
  13. Test rig for cassette exhaust gas neutralizer of internal combustion engine. Russian Patent No. 2511833 / *K. Bokov, G. Medvedev, D. Pechennikova, A.L. Novoselov, A.A. Novoselov*. No. 2012132961/06, application date 01.08.2012; publication date 10.04.2014. Bul. No. 10. 8 p. (*in Russian*).
  14. Rhodium and iridium beds for porous permeable catalysts. Patent 2530187 / *N. Gorlova, A.L. Novoselov, G. Medvedev, D. Pechennikova, A.A. Novoselov*. No. 2013139974/02; application date 27.08.2013; publication date 10.10.2014. Bul. No. 28. 7 p. (*in Russian*).
  15. *Yu. Kamyshev, G. Medvedev, N. Gorlova*. Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special issue No. 2. P. 187–197 (*in Russian*).

#### Сведения об авторах

*Медведев Геннадий Валериевич*, к.т.н., доцент кафедры наземных транспортно-технологических систем Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Адрес: 656038, Россия, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, д. 46. Тел.: +7 (909) 503-11-25. E-mail: Genatswaly@mail.ru.

*Горлова Нина Николаевна*, к.т.н., доцент кафедры менеджмента Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Адрес: 656038, Россия, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, д. 46. Тел.: +7 (913) 250-85-55. E-mail: Gnn.09@mail.ru.

#### About the authors

*Gennady V. Medvedev*, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Land Transportation & Technological Systems Department, Polzunov Altay State Technical University. Address: 46, Lenina Prospekt, Barnaul, Altay Kray, Russia, post code 656038. Tel.: +7 (909) 503-11-25. E-mail: Genatswaly@mail.ru.

*Nina N. Gorlova*, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Management Department, Polzunov Altay State Technical University. Address: 46, Lenina Prospekt, Barnaul, Altay Kray, Russia, post code 656038. Tel.: +7 (913) 250-85-55. E-mail: Gnn.09@mail.ru.

Поступила / Received: 22.03.20  
Принята в печать / Accepted: 24.08.20  
© Медведев Г.В., Горлова Н.Н., 2020