

DOI 10.15593/24111678/2021.02.03

УДК 621.436.068.001.5

**В.Д. Исаенко, А.В. Исаенко, П.В. Исаенко**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

## **ОЧИСТКА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СВС-ЭЛЕМЕНТАМИ**

Проведена оценка эффективности фильтрующих элементов из карбида титана на основе технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на моторной установке с двигателем УМЗ-451М в лабораторных условиях. В процессе отработки методики получения карбида титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза выполнен теоретический анализ деформации шихты и влияния ее на изменение пористого образца различного композиционного состава при различном давлении сжатия. При этом механизм нейтрализации выхлопных газов при их прохождении через пористую структуру карбида титана (TiC) принимался подобно вязкому течению идеальной жидкости в поровых каналах ячеистого тела. Теория и практика изучения процесса горения минеральных топлив свидетельствует об образовании оксида углерода (CO), как одного из наиболее вредных продуктов выхлопных газов, что происходит в результате неполного сгорания и пиролиза бензина. Особенно интенсивно процесс образования CO наблюдается при не обработанной «нормально» внутренней поверхности впускного коллектора ДВС после его изготовления. Поэтому в настоящем исследовании внутренние каналы коллектора тщательно очищались от шершавости. Установка на двигателе фильтра-нейтрализатора с фильтрующими элементами из карбида титана на основе технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза заметно снижает его содержание в выхлопных газах, а при их дополнительном подогреве до 250 °С и подачи в отработанные газы воздуха концентрация оксида углерода снижается в два раза в режиме рабочей частоты вращения коленчатого вала ДВС. В пересчете на европейские экологические нормы полученные результаты практически вдвое превышают нормы четвертого класса, но на 20 % меньше пятого.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, каталитический нейтрализатор, отработанные газы, моторное топливо, двигатель внутреннего сгорания, токсичные вещества, автомобильный транспорт.

**V.D. Isaenko, A.V. Isaenko, P.V. Isaenko**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation

## **PURIFICATION OF EXHAUST GASES FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH SHS-ELEMENTS**

The article evaluates the efficiency of titanium carbide filter elements based on the technology of self-propagating high-temperature synthesis on a motor unit with an UMZ-451M engine in laboratory conditions. In the process of developing a technique for producing titanium carbide by the method of self-propagating high-temperature synthesis, a theoretical analysis of the deformation of the charge and its effect on the change in porous samples of different composition at various compression pressures was performed. In this case, the mechanism of neutralization of exhaust gases as they pass through the porous structure of titanium carbide (TiC) was assumed to be similar to the viscous flow of an ideal liquid in the pore channels of a cellular body. The theory and practice of studying the combustion process of mineral fuels indicates the formation of carbon monoxide (CO), as one of the most harmful exhaust gases, which occurs as a result of incomplete combustion and pyrolysis of gasoline. The process of CO formation is particularly intense when the internal surface of the intake manifold of an internal combustion engine is not treated "normally" after its manufacture. Therefore, in the present study, the internal channels of the collector were carefully cleaned from roughness. Installing a neutralizer filter on the engine with titanium carbide filtering elements based on the technology of self-propagating high-temperature synthesis significantly reduces its content in the exhaust gases, and with their additional heating to 250 °C and the supply of air to the exhaust gases, the concentration of carbon monoxide is halved in the operating speed mode of the engine crankshaft. In terms of European environmental standards, the results obtained are almost twice as high as the standards of the fourth class, but 20 % less than the fifth.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, catalytic converter, exhaust gases, motor fuel, internal combustion engine, toxic substances, road transport.

Негативное влияние выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду общеизвестно. Наибольшую токсичность несут отработанные газы (ОГ) при эксплуатации машин, работающих в переходных режимах «разгон – торможение – разгон», что характерно для строительного производства. Поиск путей снижения концентрации ОГ занимают многие научные и производственные коллективы. На сегодняшний день наиболее привлекательным из известных способов считается очистка ОГ ДВС нейтрализаторами. На зарубежных автомобилях рекомендовали себя каталитические нейтрализаторы, на пористое тело которых нанесен тончайший слой металла платиновой группы. На отечественных автомобилях такие нейтрализаторы применяются крайне редко по двум основным причинам – они «отравляются» при работе ДВС на низкооктановых бензинах и имеют высокую цену, несмотря на то что именно Россия занимает ведущее место по запасам редкоземельных металлов, особенно палладия.

В последние годы некоторые коллективы заняты разработкой металлокерамических фильтров нейтрализаторов на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-технологии) [1–8]. Такая технология включает два этапа. Вначале спрессовывают смесь порошков металлов с неметаллами в металлической матрице заданной формы, затем один из ее краев (торцов) поджигают тепловой вспышкой (наподобие электродуговой сварки). После окончания горения образца в его внешней оболочке возникает химическая реакция, образующая волну синтеза, протекающую с постоянной скоростью вдоль всего тела. В итоге за достаточно малое время исходная спрессованная смесь преобразуется в однородное соединение с заданными физико-химическими свойствами.

В Томском государственном архитектурно-строительном университете способ получения поровой структуры по СВС-технологии с использованием метода электротеплового взрыва (ЭТВ) был применен для получения фильтроматериала для очистки ОГ бензиновых ДВС. Поиск композитов привел к целесообразности приготовления шихты из порошков титана (Ti), углерода (C) и газифицирующей добавки (ГФД) – тетраборнокислого натрия ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) [9]. В лаборатории создан лабораторно-исследовательский комплекс, включающий стенд «Теплосинтез», установку «Тест-нейтрализатор» и управляющие блоки для изготовления пористой СВС-матрицы и определения ее основных абсорбирующих фильтровальных характеристик (рис. 1).

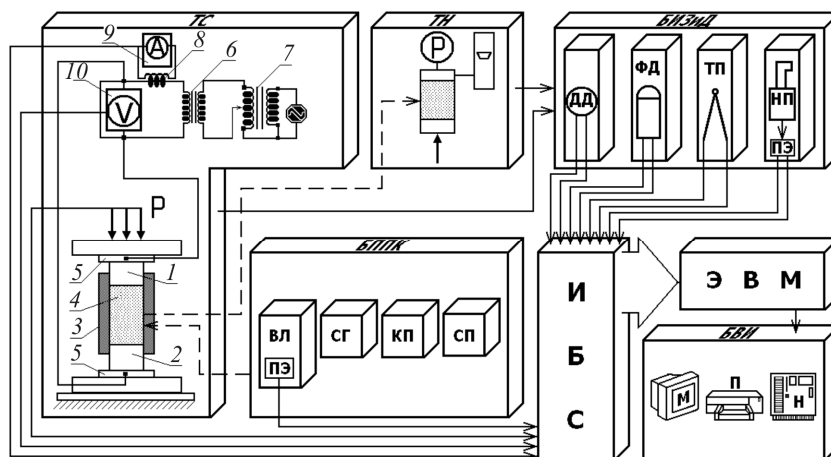


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного сбора информации: 1 – пуансон верхний; 2 – пуансон нижний; 3 – контейнер; 4 – смесь реакционная; 5 – электроды; 6 – трансформатор низковольтный силовой; 7 – регулятор напряжения; 8 – токовый трансформатор; 9, 10 – вольтамперметр; P – давление; ТС – стенд «Теплосинтез»; БПК – блок предварительной подготовки компонентов; ВЛ – весы лабораторные; ПЭ – преобразующий элемент; СГ – спектрограф; КП – камерная печь; СП – смесительный прибор; ТН – установка «Тест-нейтрализатор»; БИЗИД – блок измерительных зондов и датчиков; ДД – датчик давления; ФД – фотодиод; ТП – термопара; НП – напорный патрубок; ИБС – интерфейсный блок связи; ЭВМ – персональный компьютер; БВИ – блок вывода информации; М – монитор; П – принтер; Н – накопитель

Исследования показали, что при подборе шихты, состоящей из интерметаллидов и тугоплавких карбидов, например TiC, можно получить пористую структуру с заданными свойствами [10–17].

На рис. 2 помещена структура СВС-матрицы, полученной ЭТВ на стенде «Теплосинтез», шихта которой содержит (мас. %): Ti – 55; C – 40;  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  – 2.

В процессе отработки методики получения СВС-карбида титана выполнен теоретический анализ деформации шихты и влияния ее на изменение пористого образца различного композиционного состава при различном давлении сжатия.

Предполагалось, что при работе автотранспортных средств на постоянно меняющихся нагрузках с пульсирующим градиентом скорости и давления ОГ ДВС представляют собой вязкую смесь из различных продуктов горения рабочего тела, представляющего бензовоздушную смесь, и прочих примесей, которые выбрасываются в атмосферу под действием сил горения и газораспределительного механизма ДВС. Отсюда процесс очистки выхлопных газов в СВС-элементе воспринимался как вязкий поток идеальной жидкости между шершавыми поверхностями капилляричек ячеистого тела (рис. 2).

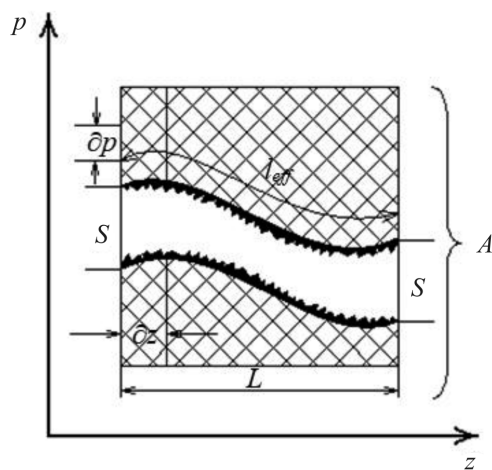


Рис. 2. Схема СВС-структуры образца для определения величин

Закономерности густого течения газов двигателя приводились исходя из правила, что полная сила тягучего сопротивления покрывается силой, обусловленной перепадом давления  $\Delta p$  на входе и выходе из структуры СВС-элемента.

Исходя из этого вязкий поток [18]

$$I_{\text{вязк}} = -\frac{\rho B_0}{\eta} \cdot \Delta p, \quad (1)$$

где  $I_{\text{вязк}}$  – плотность вязкого потока, молекула/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ );  $\rho$  – молекулярная плотность газа;  $B_0$  – параметр вязкого течения, который характеризует геометрию канала пор,  $\text{см}^2$  (для капилляра радиусом  $r$  коэффициент  $B_0 = r^2/8$ );  $\eta$  – динамическая вязкость газа,  $\text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})$ ;  $p$  – давление газа,  $\text{дин}/\text{см}^2$ .

В выражении (1) знак «минус» указывает на противоположное направление газа относительно градиента плотности.

Основными характеристиками поровой структуры изделия являются, как известно, пористость, извилистость и проницаемость. Для их оценки относительно СВС-элемента пористую структуру изобразим в виде блока со сквозными поровыми каналами цилиндрической формы радиусом  $r$  и длиной  $l_{\text{eff}}$ , не пересекающимися во всем объеме. Каждый из них на выходе из внешней поверхности блока площадью  $A$  имеет площадь отверстия  $S = \pi \cdot r^2$  (см. рис. 2). Тогда объем каналов в блоке объемом  $A \cdot L$  будет составлять  $\pi \cdot r^2 \cdot l_{\text{eff}}$ , а пористость  $\psi$  будет находиться из выражения

$$\psi = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot l_{\text{eff}}}{A \cdot L}. \quad (2)$$

Совмещая выражения (1) и (2), получим плотность вязкого потока для единицы внешней поверхности блока

$$I_{\text{вязк}} = -\frac{\pi \cdot r^2 \rho \cdot r^2}{A \eta 8} \cdot \frac{\partial p}{\partial z_{\text{eff}}}. \quad (3)$$

Здесь  $z_{\text{eff}}$  приравнивается к длине поры. Умножив правую часть (3) на  $L/l_{\text{eff}}$ , будем иметь

$$I_{\text{вязк}} = -\frac{\pi \cdot r^2}{A} \left( \frac{\rho}{\eta} \right) \left( \frac{r^2}{8} \right) \left( \frac{L}{l_{\text{eff}}} \right) \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (4)$$

Решая совместно (3) и (4), получим выражение для вычисления параметра вязкого течения, т.е.

$$B_0 = \frac{\psi}{(l_{\text{eff}}/L)^2} \left( \frac{r^2}{8} \right) = \frac{\psi}{\chi} \left( \frac{r^2}{8} \right). \quad (5)$$

Здесь  $\chi$  – коэффициент извилистости.

Принимая во внимание относительно небольшое давление выхлопных газов и размер пор СВС-элемента, для определения коэффициента проницаемости воспользуемся кнудсеновским движением в линейных единицах [19]:

$$K_0 = \frac{\psi}{\chi} \cdot \frac{r}{2}. \quad (6)$$

Приравнивая равенства (5) и (6), будем иметь

$$\frac{\psi}{\chi} = \frac{K_0^2}{2B_0}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что каждый их перечисленных параметров может быть найден, имея значения других, входящих в выражение с допустимой долей вероятности.

Очевидно, что пористость и проницаемость материалов фильтрации обуславливают структурную характеристику, побочно выражаемую через физические свойства и гидропоказатели фильтруемой жидкости или газа, из которых коэффициент проницаемости служит количественной мерой и находится по закону Дарси:

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot b}{F_{\phi} \cdot \Delta p}, \quad (8)$$

где  $Q$  – расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\mu$  – вязкость воздуха при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $b$  – толщина перегородки СВС-элемента,  $\text{мм}$ ;  $F_{\phi}$  – площадь фильтрующей перегородки,  $\text{мм}^2$ ;  $\Delta p$  – перепад давления воздуха при прохождении через пористую перегородку,  $\text{Па}$ .

Были изготовлены и испытаны образцы фильтроэлементов из карбида титана в виде таблеток диаметром  $d = 40$  мм и толщиной  $b = 5$  мм с различной пористой структурой на изготовленном стенде «Тест-нейтрализатор» [20]. Типовая структура образцов по СВС-технологии представлена на рис. 3.

Пористость измерялась следующим образом. В заполненный бензином «Галоша» градуированный стеклянный цилиндр помещался образец объемом  $Q_{\text{м}}$  и полностью пропитывался. Объем бензина в цилиндре увеличивался адекватно объему «скелета»  $Q_{\text{ск}}$  образца. Тогда его пористость

$$\psi_o = 1 - \frac{Q_{ск}}{Q_m} \quad (9)$$

Размер пор  $d_n$  рассчитывался согласно [20] исходя из выражения

$$\frac{\sqrt{K}}{d_n} = \frac{\psi^{1,5}}{14,69(1-\psi)} \quad (10)$$

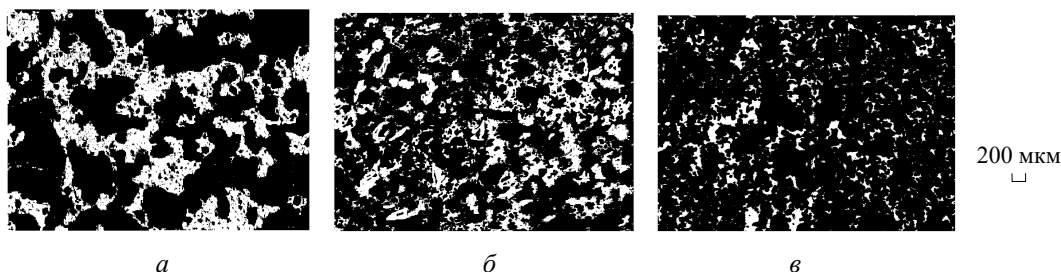


Рис. 3. Вид структуры пористого СВС-образца из Ti–C:  
*a* – при C/Ti = 0,4; *б* – C/Ti = 0,65; *в* – C/Ti = 0,9

Числовые характеристики закона случайного распределения пор по размерам показали, что закону нормального распределения поддаются структуры C/Ti = 0,40 и C/Ti = 0,65 с объемом газификатора до 1,5 %. При этом математическое ожидание размера пор составило 200–220 мкм при коэффициенте вариации 0,29–0,33. В поровой структуре C/Ti = 0,90 крупность пор значительно ниже. В этом случае математическое ожидание составляет около 57 мкм, а коэффициент вариации – более 0,43, что не соответствует нормальному закону.

Существенное влияние на формирование поровой структуры СВС-образца оказывает состав и количество ГФД в исходной смеси.

Так, добавка  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  от 0,2 до 2,0 мас. % увеличивает объем конечного продукта в 1,5–3,3 раза с очевидным изменением пористости.

Рис. 4 содержит расходные характеристики СВС-образцов с различным содержанием углерода в исходной смеси в зависимости от перепада давления воздуха.

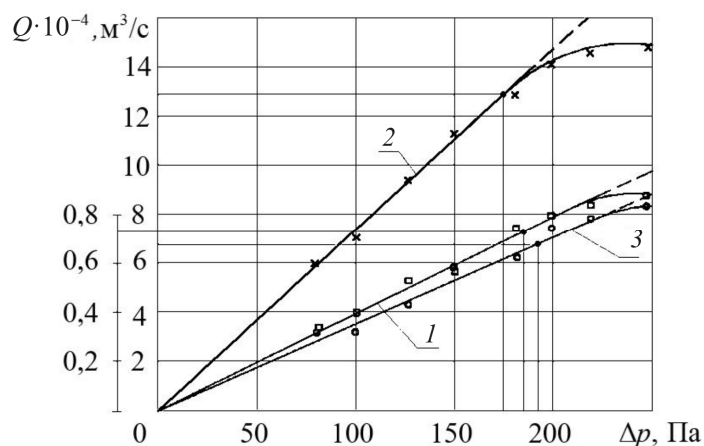


Рис. 4. Расходные характеристики испытуемых элементов из карбида титана при разном объеме углерода в смеси: 1 – C = 40 %; 2 – C = 65 %; 3 – C = 90 %

Для каждого перепада давления на образце вычислялся расход воздуха по формуле

$$Q = Q_p \left[ \frac{(P_p + P_0) 293}{P_0^m (273 + t)} \right], \quad (11)$$

где  $Q_p$  – расход воздуха по показателям ротаметра, м<sup>3</sup>/с;  $P_p$  – давление воздуха в ротаметре, Па;  $P_0$  – барометрическое давление во время испытаний,  $P_0^H = 1,02 \cdot 10^5$  Па;  $t$  – температура воздуха, °С.

Искомая величина расхода воздуха от перепада давления определялась графическим путем по известной методике из ГОСТ 25283–82.

С использованием теоретических предпосылок и экспериментальных данных для указанных образцов подсчитаны основные характеристики пористой структуры (таблица).

Таблица показывает, что основные характеристики СВС-структуры значительно зависят от состава исходной смеси и изменяются неоднозначно. Так, при содержании в смеси углерода около 40 % коэффициент проницаемости  $K$  составляет 0,28 Дс. Повышение углерода до 65 % увеличивает проницаемость до максимальной величины, т.е. 5,26 Дс, а при  $C = 90$  % проницаемость образца снижается более чем в два раза.

Характеристики структуры пористого СВС-образца из карбида титана при ГФД = 1,5 %

Номер образца	Состав шихты, %		Скорость течения газов $v$ , м/с	Размер пор $d_p$ , мкм	Коэффициенты		
	C	Ti			газопроницаемости $K \cdot 10^{-12}$ , м <sup>2</sup> (Дс)	пористости $\psi_0$	извилистости $\chi$
1	40	58	0,057	120	0,28	0,146	182,5
2	65	33	1,07	17,5	5,25	0,70	1,52
3	90	8	0,51	4,0	2,41	0,86	1,02

Низкий показатель коэффициента проницаемости при достаточно высокой пористости СВС-элемента с малой концентрацией сажи, на наш взгляд, объясняется высокой (до 0,9) долей «слепых» пор, обладающих такой же большой извилистостью.

Повышение объема сажи до 65 % способствует уменьшению размера пор, в то время как часть их открытости повышается, что и гарантирует увеличение коэффициента проницаемости до 5,2 Дс. Следующее повышение концентрации сажи в шихте способствует существенному уменьшению размера пор. Но несмотря на увеличенную долю открытых пор, коэффициент проницаемости уменьшается.

Такая тенденция в формировании ячеистой структуры по СВС-технологии была учтена при изготовлении экспериментальных фильтрующих элементов для нейтрализации выхлопных газов автомашин.

Оценка эффективности фильтроэлементов выполнена на моторной установке с двигателем УАЗ-451М в лабораторных условиях. Изготовленные фильтроэлементы в виде полых цилиндров устанавливались в корпусе стандартного глушителя автомобиля. Результаты сравнительных испытаний токсичности выхлопных газов моторной установки с фильтром из карбида титана и без него показаны на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что содержание оксида углерода на выходе из глушительной трубы значительно разнится в зависимости от наличия нейтрализатора, несмотря на то что их образование в двигателе протекает по одному сценарию, поскольку состав топливно-воздушной смеси находился под контролем. В результате было установлено, что двигатель без нейтрализатора выбрасывает СО 3–10 %, тогда как с СВС-элементом лишь 0,2–0,6 % при работе ДВС на допустимых рабочих скоростных режимах. Учитывая, что неполное сгорание бензина и его пиролиз способствуют росту СО при необработанной внутренней поверхности впускного коллектора, для исключения этого явления перед проведением эксперимента его внутренние каналы были отшлифованы. Поэтому уровни выбросов оксида углерода, представленные на рис. 5, – свидетельство эффективной работы нейтрализатора из СВС-материала.

В ходе испытаний было также установлено, что при дополнительном прогреве выхлопных газов ДВС до 250 °С потоком воздуха концентрация СО снижается в 2–2,3 раза в том же диапазоне рабочих скоростей двигателя.

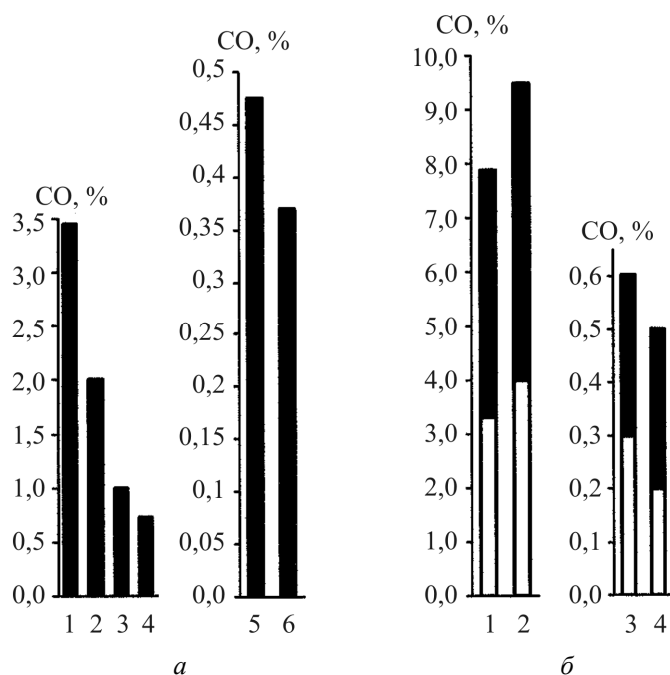


Рис. 5. Уровни выбросов CO с ОГ моторной установки УАЗ-451М при частоте вращения коленчатого вала: 1, 3 –  $n_{\min}$ , 2, 4 –  $0,8n_{\text{ном}}$ ; а – по стандарту, б – по факту; 1, 2 – без нейтрализатора; 3, 4 – с СВС-фильтром; 5 – по четвертому классу европейских экологических норм; 6 – по пятому классу европейских экологических норм

В заключение отметим, что в пересчете на европейские экологические нормы концентрация CO в выхлопных газах с испытуемым нейтрализатором в 1,7–1,8 раза превышает требования четвертого класса, но на 20 % ниже пятого. Но несмотря на хорошие результаты экспериментов по эффективной работе нейтрализатора из СВС-материала на двигателе внутреннего сгорания в условиях лаборатории, они требуют уточнений в ходе эксплуатационных испытаний на мобильных машинах с бензиновыми двигателями.

### Список литературы

1. Алдошин С.М., Алымов М.И. Технологическое горение: коллективная монография. – М.: КПК, 2018. – 611 с.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование неоднородных волновых структур при горении пористых сред / П.М. Кришеник [и др.] // Синтез и консолидация порошковых материалов: сб. тез. Междунар. конф. – Черноголовка, 2018. – С. 415–419.
3. SHS-produced cast refractory Ni and Ti aluminides and Nb compounds for reprocessing into micro granules used in 3d additive technologies / V.N. Sanin [et al.] // Nonisothermal Phenomena and Processes: From Thermal Explosion Theory to Structural Macrokinetics. – 2016. – P. 36–37.
4. NiAl-Based electrodes by Combined use of centrifugal SHS and induction remelting / Yu.S. Pogozhev [et al.] // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2016. – Vol. 25, № 3. – P. 186–199.
5. Исследование влияния температуры переплава на структурную наследственность сплавов, полученных методом центробежной СВС-металлургии / В.В. Санин [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 1. – С. 63–71.
6. Rahul M. Intermetallic Matrix Composites Elsevier Ltd. – Woodhead Publishing, India, 2017. – 486 p.
7. Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С. Разработка технологий термовременной обработки расплава на основе изучения физико-химических свойств их расплавов // Физико-химические основы металлургических процессов: сб. материалов / ИМЕТ РАН. – М., 2017. – С. 113.

8. Syngellakis S., Connor J. *Advanced Methods and Technologies in Metallurgy in Russia*. – Springer, 2018. – 196 p.
9. Способ получения пористого материала / В.Э. Борзых [и др.] // Патент 2210461 РФ. Опубл. 20.08.2003, бюл. № 23. – 9 с.
10. Hou X., Yu J. Phase and structure formation mechanisms of SHS synthesized composite coatings // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44, № 7. – P. 8012–8017.
11. Юхвид В.И., Горшков В.А., Санин В.Н. Получение новых керамических и композиционных материалов методами СВС-металлургии: колл. монография // *Технологическое горение* / под общ. ред. акад. С.М. Алдошина. – М., 2018. – 612 с.
12. Melting of primary carbides in a cobalt-base superalloy / W. Gui [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 787. – P. 152–157.
13. Azevedo J., Cabrera A., Allwood J. Energy and material efficiency of steel powder metallurgy // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 328. – P. 329–336.
14. Ziatdinov M. SHS technology of composite alloys // *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium* / Ed. by M.I. Alymov, O.A. Golosova. – Moscow, 2018. – P. 307–310.
15. Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Lisina T.G. The influence of gas flow on the manifestation of the percolation phase transition in granular mixtures Ti + C // *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium* / Edited by M.I. Alymov, O.A. Golosova. – Moscow, 2018. – P. 236–238.
16. Yukhvid V.I. *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis Metallurgy. History, Theory, Technology, and Products*. – 1st ed. – Elsevier Science, 2017. – 466 p.
17. Compact aluminum oxynitride based ceramic obtained by the SHS-metallurgy method / V.A. Gorshkov [et al.] // *Glass and Ceramics*. – 2017. – Vol. 74, № 5–6. – P. 199–203.
18. Мейсон Э., Малинаукас А. Перенос в пористых средах: модель запыленного газа: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 200 с.
19. Исследование процессов горения высококалорийной термитной смеси на поверхности титановой основы / Д.Е. Андреев [и др.] // *Физика горения и взрыва*. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 93–98.
20. Экспериментальные исследования получения пористых материалов в режиме СВ-синтеза для трегеров / В.Э. Борзых [и др.] // *Вестник ТГАСУ*. – 2003. – № 1. – С. 151–155.

#### References

1. Aldoshin S.M., Alymov M.I. *Tekhnologicheskoe gorenje. Kollektivnaya monografiya* [Technological combustion. Collective monograph]. Moscow, *KPK*, 2018, 611 p.
2. Kryshenik P.M. [et al.]. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie neodnorodnyh volnovykh struktur pri gorenii poristykh sred* [Theoretical and experimental study of inhomogeneous wave structures in the combustion of porous media Gorenje]. *Sintez i konsolidaciya poroshkovykh materialov. Sbornik tezisov Mezhdunarodnoj konferencii*, Chernogolovka, 2018, pp. 415–419.
3. SHS-produced cast refractory Ni and Ti aluminides and Nb compounds for reprocessing into micro granules used in 3d additive technologies / V.N. Sanin [et al.] // *Nonisothermal Phenomena and Processes: From Thermal Explosion Theory to Structural Macrokinetics*, 2016, pp. 36–37.
4. NiAl-Based electrodes by Combined use of centrifugal SHS and induction remelting / Yu.S. Pogozhev [et al.], *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2016, Vol. 25, no. 3, pp. 186–199.
5. Sanin V.V. [et al.]. *Issledovanie vliyaniya temperatury pereplava na strukturmuyu nasledstvennost' splavov, poluchennykh metodom centrobeznoy SVS-metallurgii* [Investigation of the influence of the remelting temperature on the structural heredity of alloys obtained by the method of centrifugal SHS-metallurgy]. *Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya*, 2016, no. 1, pp. 63–71.
6. Rahul M. *Intermetallic Matrix Composites* Elsevier Ltd, *Woodhead Publishing*, India, 2017, 486 p.
7. Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Tsepelev V.S. *Razrabotka tekhnologij termovremennoj obrabotki rasplava na osnove izucheniya fiziko-himicheskikh svoystv ih rasplavov* [Development of technologies for thermal-modern melt treatment based on the study of the physical and chemical properties of their melts]. *Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov. Sbornik materialov*, IMET RAS, Moscow, 2017, pp. 113.
8. Syngellakis S., Connor J. *Advanced Methods and Technologies in Metallurgy in Russia*, Springer, 2018, 196 p.



9. Borzykh V.E. [et al.]. Sposob polucheniya poristogo materiala [Method for producing a porous material]. *Patent 2210461 RF*, 2003, no. 23. – 9 p.
10. Hou X., Yu J. Phase and structure formation mechanisms of SHS synthesized composite coatings // *Ceramics International*, 2018, Vol. 44, no. 7, pp. 8012–8017.
11. Yuxhvid V.I., Gorshkov V.A., Sanin V.N. Poluchenie novykh keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov metodom SVS-metallurgii. Kollektivnaya monografiya [Production of new ceramic and composite materials by SHS-metallurgy methods. Collective monograph]. *Tekhnologicheskoe gorenje*, Moscow, 2018, 612 p.
12. Gui W. [et al.]. Melting of primary carbides in a cobalt-base superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, Vol. 787, pp. 152–157.
13. Azevedo J., Cabrera A., Allwood J. Energy and material efficiency of steel powder metallurgy, *Powder Technology*, 2018, Vol. 328, pp. 329–336.
14. Ziatdinov M. SHS technology of composite alloys, *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium*, Moscow, 2018, pp. 307–310.
15. Seplyarskii B.S., Kochetkov R.A., Lisina T.G. The influence of gas flow on the manifestation of the percolation phase transition in granular mixtures Ti + C, *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium*, Moscow, 2018, pp. 236–238.
16. Yuxhvid V.I. Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis Metallurgy. History, Theory, Technology, and Products. – 1st edition, *Elsevier Science*, 2017, 466 p.
17. Gorshkov V.A. [et al.] Compact aluminum oxynitride based ceramic obtained by the SHS-metallurgy method, *Glass and Ceramics*, 2017, Vol. 74, no. 5–6, pp. 199–203.
18. Mason E., Malinauskas A. Perenos v poristyyh sredah: model' zaplyennogo gaza [Transport in porous media: a dusty gas model]. Moscow, *Mir*, 1986, 200 p.
19. Andreev D.E. [et al.]. Issledovanie processov goreniya vysokokalorijnoj termitnoj smesi na poverhnosti titanovoj osnovy [Investigation of the combustion processes of a high-calorie thermite mixture on the surface of a titanium base Gorenje] *Fizika goreniya i vzryva*, 2017, Vol. 53, no. 5, pp. 93–98.
20. Borzykh V.E. [et al.]. Eksperimental'nye issledovaniya polucheniya poristyykh materialov v rezhime SV-sinteza dlya tregerov [Experimental studies of the production of porous materials in the SV synthesis mode for triggers]. *Vestnik TGASU*, Tomsk, 2003, no. 1, pp. 151–155.

Получено 13.04.2021

#### Об авторах

**Исаенко Виктор Дмитриевич** (Томск, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: 3154@70.ru).

**Исаенко Алексей Викторович** (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: vip.seductor@mail.ru).

**Исаенко Павел Викторович** (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и электротехники Томского государственного архитектурно-строительного университета (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: isaenko\_pv@mail.ru).

#### About the authors

**Viktor D. Isaenko** (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Department of Road Transport and Electrical Engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: 3154@70.ru).

**Alexey V. Isaenko** (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Road Transport and Electrical Engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: vip.seductor@mail.ru).

**Pavel V. Isaenko** (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Road Transport and Electrical Engineering, Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russian Federation, e-mail: isaenko\_pv@mail.ru).