



О. А. БАЛАНДИНА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

DETERMINATION OF THE DESIGN FEATURES OF THE DEVICE  
FOR NEUTRALIZING TOXIC COMPONENTS OF FLUE GASES

*Рассмотрено влияние нагрузки котельного агрегата на область протекания гетерогенных реакций процесса каталитической очистки дымовых газов. Определены оптимальные геометрические характеристики монолита нейтрализатора при варьировании паропроизводительности котельного агрегата ТГМЕ-464 от 220 до 500 т/ч. Расчеты выполнены с применением математической модели для условий действующего энергетического оборудования. Детерминирован оптимальный размер элементарной ячейки блока катализатора в широком диапазоне регулирования нагрузки котла. Полученные в результате исследования данные легли в основу проектирования образца промышленного нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента.*

*The influence of the boiler unit load on the area of heterogeneous reactions of the process of catalytic flue gas purification is considered. The optimal geometric characteristics of the neutralizer monolith were determined when the steam capacity of the TGME-464 boiler unit varied from 220 to 500 t/h. The calculations were performed using a mathematical model for the conditions of the operating power equipment. The optimal size of the unit cell of the catalyst block is determined in a wide range of boiler load regulation. The data obtained as a result of the study formed the basis for designing a sample of an industrial neutralizer of toxic flue gas components without the introduction of an external reagent.*

**Ключевые слова:** катализатор, очистка дымовых газов, выбросы, геометрические характеристики, котельный агрегат

**Keywords:** catalyst, flue gas purification, emissions, geometric characteristics, boiler unit

Сокращение атмосферных выбросов от котельных установок, сжигающих газообразное топливо, может осуществляться по двум основным направлениям: совершенствование технологических процессов и очистка выбросов при сохранении существующих технологий. Одним из наиболее универсальных методов газоочистки является каталитическая нейтрализация, в процессе осуществления которой отсутствует образование вторичных загрязнителей [1]. В промышленных условиях процессы каталитической очистки проходят в области внешней диффузии, поэтому скорость реакции определяется макрокинетическими факторами [2].

При сжигании природного газа в топках котельных агрегатов основными загрязнителями, выбрасываемыми в атмосферу, являются оксиды азота и углерода. Одновременную очистку по данным загрязнителям позволяют проводить методы глубокого каталитического окисления [3].

С целью установления оптимальных конструктивных особенностей керамического носителя блока-реактора принимались эксплуатационные параметры и компоновочные решения, определенные по результатам режимно-наладочных испытаний котельного агрегата ТГМЕ-464 (КА № 12) ТЭЦ ВАЗа [4]. Выбор промотора катализа определялся его ак-

тивностью в отношении азотистых соединений, так как реакции окисления СО на поверхности реактора идут в прямом направлении при значениях температуры потока до 1500 °С. Наибольшая селективность нейтрализации NO<sub>x</sub>, обусловленная переходом восстановительных реакций к первому порядку в интервале температур от 250 до 450 °С, наблюдается при использовании нанесенного катализатора, содержащего активный компонент в виде 0,5 % Pt [4].

Была сформирована общая конструкция каталитического блока, представляющего собой реактор из керамического монолита с сотовой структурой в виде ячеек, образующих каналы квадратного сечения, на которые нанесен слой каталитически активного вещества (платины).

В зависимости от соотношения скоростей химического взаимодействия и подвода окиси азота к поверхности катализатора процессы нейтрализации могут протекать в кинетической или диффузионной областях, а следовательно, ограничиваются не только интенсивностью молекулярного превращения, но и внешними параметрами. Основными физическими характеристиками дымовых газов, обуславливающими диффузионные процессы, являются объемная скорость и время пребывания потока выбросов в слое монолита блока-реактора:

$$\tau = \frac{3600 \cdot V_{\text{кат}} \cdot \varepsilon}{Q_{\text{д.г.}}} \cdot 10^{-3}, \text{ с}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{кат}}$  – объем монолита блока-реактора, м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – доля свободного объема монолита блока-реактора (принималась 0,5);  $Q_{\text{д.г.}}$  – расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/ч [5].

Зависимость времени контактирования дымовых газов на керамическом монолите катализатора от их объемной скорости, представленная в табл. 1, вычислялась на основании данных режимных карт станционного котла ТГМЕ-464, установленного на территории ТЭЦ Волжского автозавода г. Тольятти. Геометрические характеристики блока-реактора определялись из расчета промышленных условий эксплуатации и жестко привязаны к конструктивным габаритам газоходов агрегата в [4].

Молекулярно-кинетические исследования процессов нейтрализации оксидов азота на

поверхности каталитического монолита показали, что при объемной скорости реагентов до 15000 ч<sup>-1</sup> определяющим фактором, лимитирующим процесс катализа, является внешнедиффузионное торможение. При возрастании объемной скорости свыше 15000 ч<sup>-1</sup> и температуре дымовых газов до 500 °С общую скорость нейтрализации лимитирует химическая реакция. Переход реакций в кинетическую область связан с высокой турбулентностью потока дымовых газов, влияющей на возрастание коэффициента молекулярной диффузии [6, 7].

Из конструктивных характеристик на диффузионные процессы превалирующее влияние оказывает размер ячейки сотового монолита. Для определения ее оптимальных размеров использовали выкладки авторов [8–10], согласно которым рассчитывали толщину пограничного слоя:

$$\delta = \frac{C_0^{NO_x} \cdot D_{\text{д.г.}}}{C^{NO_x(0)} \cdot k_m} \cdot 10^3, \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – расстояние от оси стенки до середины элементарной ячейки монолита, мм;  $k_m$  – расчетная константа скорости лимитирующей реакции окислительного процесса, с<sup>-1</sup>;  $D_{\text{д.г.}}$  – коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $C_0^{NO_x(0)}$  – объемная концентрация NO<sub>x</sub> в дымовых газах, моль/м<sup>3</sup>;  $C^{NO_x(0)}$  – концентрация NO<sub>x</sub> на поверхности каталитического слоя монолита, моль/м<sup>2</sup>.

Для процессов нейтрализации, при заданном объеме катализатора, увеличение линейной скорости и уменьшение размера элементарной ячейки монолита в определенных пределах благоприятно сказывается на степени превращения [10]. Однако возрастание скорости газового потока приводит к увеличению силы трения и, соответственно, гидравлического сопротивления слоя катализатора [6].

Детерминация оптимальных геометрических характеристик монолита блока-реактора проводилась с учетом контролирующей стадии процесса при варьировании паропроизводительности котельного агрегата от 220 до 500 т/ч. Анализ выполнялся для вариантов типоразмеров ячеек: 6x6, 8x8 и 10x10 мм. Габариты реактора определялись степенью эффективности процессов газоочистки в рамках стационарного

Таблица 1

Показатель	Нагрузка котла ТГМЕ-464, $D_{\text{пр}}$ т/ч							
	220	260	300	340	380	420	460	500
Объемная скорость, ч <sup>-1</sup>	18168	20095	22578	24738	27081	28381	31467	34014
Время контактирования, с	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,13	0,11	0,11

режима протекания реакций нейтрализации  $NO_x$  в промышленных условиях.

Анализ распределения концентраций оксидов азота по длине каталитического слоя выполнялся с помощью математической модели взаимодействия  $NO_x$  с атомарным кислородом на поверхности Pt катализатора, рассмотренной в [4]:

$$\text{Для } NO \begin{cases} \frac{\partial C^{NO_x}}{\partial h} = \frac{\sum_{m=1}^z k_m \cdot C_{(0)}^{NO_x}}{v_z}; \\ \frac{\partial T}{\partial h} = \frac{\sum_{m=1}^z k_m \cdot C_{(0)}^{NO_x} \cdot q_m}{v_z \cdot c_p}; \\ \frac{\partial C^{NO_x}}{\partial \tau} = \beta \cdot (C_0^{NO_x} - C_{(0)}^{NO_x}) \cdot F; \\ \sum_{m=1}^z k_m \cdot C_{(0)}^{NO_x} \cdot q_m = \alpha \cdot (T_{\partial.z.} - T_k) \cdot F, \end{cases} \quad (3)$$

где  $z$  – число реакций;  $\alpha$  – удельная площадь поверхности катализатора,  $m^2/m^3$ ;  $T_k$ ,  $T_{\partial.z.}$  – температура на поверхности катализатора и температура дымовых газов соответственно, К;  $\beta$  – коэффициент теплоотдачи,  $kВт/(m^2 \cdot K)$ ;  $q_m$  – тепловой эффект реакции  $m$ ,  $кДж/моль$ ;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $моль/(m^2 \cdot c \cdot моль/м^3)$ ;  $h_k$  – высота каталитического слоя, м;  $v_z$  – скорость потока газа, м/с;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость потока газа,  $кДж/(m^3 \cdot K)$ .

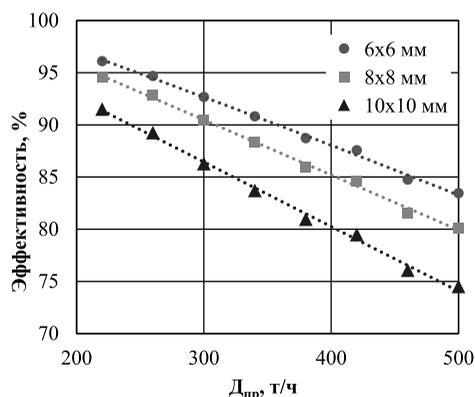


Рис. 1. График изменения эффективности очистки блока катализатора при варьировании нагрузки котельного агрегата

Определенная с помощью математической модели зависимость распределения градиента концентраций  $NO_x$  по длине блока-реактора от размеров элементарной ячейки его носителя приведена в табл. 2.

Графические зависимости степени эффективности очистки при условии равномерного распределения дымовых газов по слою катализатора от конструктивных особенностей монолита блока-реактора в диапазоне нагрузки котла от 220 до 500 т/ч представлены на рис. 1–3.

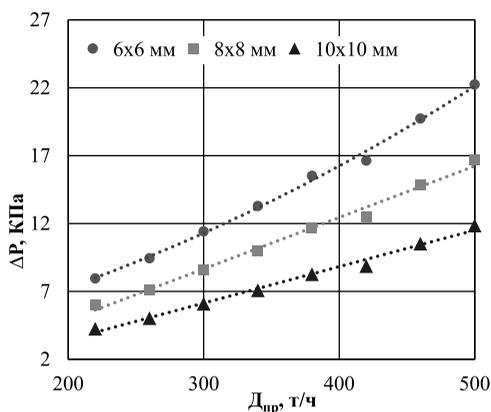


Рис. 2. График изменения гидравлического сопротивления блока катализатора при варьировании нагрузки котельного агрегата

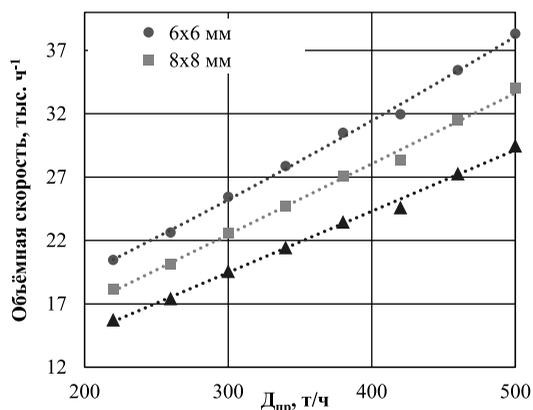


Рис. 3. График изменения объемной скорости дымовых газов в сечении блока катализатора при варьировании нагрузки котельного агрегата

Таблица 2

Размер ячейки, мм	Градиент концентраций $NO_x$ , % об/м, при нагрузке котла ТГМЕ-464, $D_{гр}$ , т/ч							
	220	260	300	340	380	420	460	500
6x6	0,013	0,011	0,010	0,010	0,010	0,011	0,012	0,012
8x8	0,014	0,012	0,011	0,011	0,011	0,012	0,013	0,014
10x10	0,017	0,014	0,013	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016

**Вывод.** Экономическая эффективность предлагаемого способа очистки в промышленных условиях зависит от объемной скорости дымовых газов и минимального гидравлического сопротивления слоя реактора, при которых обеспечивается требуемая степень нейтрализации токсичных компонентов выбросов. По данным корреляционных зависимостей можно сделать вывод, что наиболее оптимальным вариантом по соотношению потерь давления и уровня снижения приведенной концентрации  $NO_x$  по длине каталитического слоя является блок-реактор с геометрическими параметрами ячейки 8x8 мм. Предложенная конструкция блочного носителя позволяет получить оптимальную степень очистки дымовых газов при минимально возможных энергозатратах. Математическая модель, ранее предложенная автором [4], даёт возможность прогнозировать степень эффективности очистки, в том числе в условиях производства. Полученные в ходе исследования данные использованы в разработке полезной модели промышленного нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегтярев А.В., Кича М.А. Формирование каталитических оксидных покрытий на металлических носителях // *Материалы Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной году российского кино*. 2017. С. 154–157.
2. Семенова Т.А., Лейтес И.Л. Очистка технологических газов. М.: Химия, 1977. 488 с.
3. Крылов О.В. Гетерогенный катализ. Минск: Академкнига, 2004. 680 с.
4. Balandina O.A. On the question of increasing the purification efficiency of flue gases from the boiler unit of HEPS Volzhsky automobile plant // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021. V. 1083. N. 1. P. 012078.
5. Разработка блочного катализатора сотовой структуры и реактора очистки выхлопных газов от оксидов азота / В.А. Векшин, Е.Р. Грабовецкая, В.А. Лобойко, А.В. Кобзев // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 5. С. 223–227.
6. Лазарев М.Ю., Махоткин И.А., Шарафисламов Ф.Ш. Исследование кинетики реакции восстановления оксидов азота аммиаком на различных катализаторах // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 7. С. 11–14.
7. Моисеев М.М. Исследование кинетики процесса восстановления оксидов азота на никель-медных катализаторах // *Проблемы науки. Химия и химическая технология: материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Новомосковск: РИЦ НИ РХТУ, 2021. С. 15–19.
8. Ткаченко С.Н. Гомогенное и гетерогенное разложение озона: дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. МВ Ломоносова, 2004. 400 с.
9. Воробьев А.Х. Диффузионные задачи в химической кинетике. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 98 с.
10. Технология катализаторов / И.П. Мухленов, Е.И. Добкина, В.И. Дерюжжина, В.Е. Сороко; под ред. И.П. Мухленова. Изд.3-е, перераб. Л.: Химия, 1989. 272 с.

#### REFERENCES

1. Degtyarev A.V., Kicha M.A. Formation of catalytic oxide coatings on metal carriers. *Materialy Vserossijskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, posvjashhennoj godu rossijskogo kino* [Materials of the All-Russian conference of students, graduate students and young scientists dedicated to the year of Russian cinema]. 2017, pp. 154–157. (In Russian).
2. Semenova T.A., Leites I.L. *Ochistka tehnologicheskikh gazov* [Process Gas Purification]. Moscow, Chemistry, 1977. 488 p.
3. Krylov O.V. *Geterogennyj kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Minsk, Akademkniga, 2004. 680 p.
4. Balandina O.A. On the question of increasing the purification efficiency of flue gases from the boiler unit of HEPS Volzhsky automobile plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2021. V. 1083. N. 1. P. 012078.
5. Vekshin V.A., Grabovetskaya E.R., Loboiko V.A., Kobzev A.V. Development of block catalyst of honeycomb structure and reactor for purification of exhaust gases from nitrogen oxides. *Vestnik Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo Universiteta im. V.G. Shuhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2015, no. 5, pp. 223–227. (in Russian)
6. Lazarev M.Yu., Makhotkin I.A., Sharafislamov F.Sh. Study of the kinetics of the reaction of reduction of nitrogen oxides with ammonia on various catalysts. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 7, pp. 11–14. (in Russian)
7. Moiseev M.M. Research on the kinetics of the process of reduction of nitrogen oxides on nickel-copper catalysts. *Problemy nauki. Himija i himicheskaja tehnologija: materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii* [Problems of science. Chemistry and chemical technology: materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Novomoskovsk, RIC NI RCTU, 2021, pp. 15–19. (In Russian).
8. Tkachenko S.N. *Gomogennoe i geterogennoe razlozhenie ozona. Cand. Diss.* [Homogeneous and heterogeneous decomposition of ozone. Cand. Diss.]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2004. 400 p. (in Russian)
9. Vorobyov A.X. *Diffuzionnye zadachi v himicheskoi kinetike* [Diffusion problems in chemical kinetics]. Moscow, Publishing House of Moscow University, 2003. 98 p.
10. Mukhlenov I.P., Dobkina E.I., Deryuzhkina V.I., Soroko V.E. *Tehnologija katalizatorov. Izdanie 3 pereperabotannoe* [Catalyst technology. Edition 3 revised]. Leningrad, Chemistry, 1989. 272 p.

Об авторе:

**БАЛАНДИНА Ольга Александровна**

старший преподаватель кафедры  
теплогазоснабжения и вентиляции  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

**BALANDINA Olga Al.**

Senior lecturer of the Heat and Gas Supply and  
Ventilation Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244  
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

Для цитирования: *Баландина О.А.* Определение конструктивных особенностей устройства для нейтрализации токсичных компонентов дымовых газов // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 64–68. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.08.

For citation: *Balandina O.A.* Determination of the design features of the device for neutralizing toxic components of flue gases. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 4, pp. 64–68. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.08.

### ПОДПИСКА–2024

на январь–декабрь

в «каталоге «Газеты и журналы – 2024»  
и на сайте «ООО Урал-Пресс Округ»  
<http://www.ural-press.ru/>

Уважаемые читатели!

Обратите внимание, что с 1 сентября 2023 г.  
проводится подписная кампания на журналы  
Самарского государственного технического университета  
на 2024 год

**18106 Вестник Самарского государственного технического университета.**  
Серия «Технические науки»

**18108 Вестник Самарского государственного технического университета.**  
Серия «Физико-математические науки»

**70570 Градостроительство и архитектура**

**18107 Вестник Самарского государственного технического университета.**  
Серия «Психолого-педагогические науки»

**41340 Вестник Самарского государственного технического университета.**  
Серия «Философия»

Условия оформления подписки можно найти  
на сайте <http://www.ural-press.ru/>