

Научная статья

УДК 656.13(1-21):621.43.06:504.3.064; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-100-105

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Гавкалюк Богдан Васильевич;

✉ **Ложкин Владимир Николаевич.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ vnlojkin@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос физико-математического представления термической динамики (кинетики) процесса конверсии отработавших газов в каталитическом нейтрализаторе на опасных с точки зрения возгорания, неуправляемых аварийных режимах его работы в эксплуатации. К современным автомобильным двигателям предъявляется требование обеспечения пожарной безопасности. На двигателях с нейтрализаторами оно вступает в противоречие с жесткими международными экологическими стандартами, соблюдение которых принуждает опасно разогреваемый нейтрализатор размещать в моторном отсеке рядом с легковоспламеняющимися горючими материалами. Проблемный вопрос предлагается решать путем контроля и диагностирования пожарно-аварийных режимов эксплуатации нейтрализаторов безразборным способом, научно обоснованным на междисциплинарной основе, – по анализу состава отработавших газов. Метод положительно протестирован в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: автомобиль, нейтрализатор, возгорание, предупреждение, теория, аварийный режим, диагностирование

Для цитирования: Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Научные основы предупреждения возгорания автомобильных нейтрализаторов в эксплуатации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 100–105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-100-105.

Scientific article

SCIENTIFIC BASIS FOR PREVENTION OF FIRES OF AUTOMOBILE CONVERTERS IN OPERATION

Gavkalyuk Bogdan V.;

✉ **Lozhkin Vladimir N.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. The issue of physical and mathematical representation of the thermal dynamics (kinetics) of the process of conversion of exhaust gases in a catalytic converter in dangerous, from the point of view of fire, uncontrolled emergency operating modes of its operation is considered. Modern automobile engines are required to ensure fire safety. On engines with converters, this conflicts with stringent international environmental standards, the satisfaction of which requires the dangerously heated converter to be placed in the engine compartment next to flammable combustible materials. It is proposed to solve the problematic issue by monitoring and diagnosing fire and emergency operating conditions of neutralizers in an in-place method, scientifically substantiated on an interdisciplinary basis – by analyzing the composition of the exhaust gases. The method has been positively tested under real operating conditions.

Keywords: car, neutralizer, fire, warning, theory, emergency mode, diagnostics fire truck, emergency safety, interdisciplinary scientific approach

For citation: Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Scientific basis for prevention of fires of automobile converters in operation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 100–105. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-100-105.

Введение. Состояние проблемы

Главным противоречием, актуализировавшим тему настоящего исследования, стало обострение обеспокоенности ученых [1, 2], общественных, государственных и религиозных [3] деятелей в сфере угроз изменения климата и ухудшения здоровья населения в крупных городах мира [4] из-за избыточного загрязнения атмосферы парниковыми газами и поллютантами, главными из которых являются: CO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, БП (бензо- α -пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$), CO , CH_4 , NO_x , SO_2 . Стремление к смягчению угроз ухудшения здоровья населения в крупных городах [5, 6] привело, в частности, к оснащению двигателей автомобилей, являющихся основным поставщиком в атмосферу вредных (загрязняющих) веществ (ЗВ), каталитическими нейтрализаторами (КН) [7, 8].

КН представляют собой теплообменные контактные аппараты, работающие на принципах экзотермических процессов с мощным выделением тепла и разогревом реактора до 500–600 °С, а в аварийных режимах – до 900–1 200 °С [9]. Их размещение под кузовом автомобиля и в моторных отсеках поблизости с легковоспламеняющимися материалами существенно повысило риск пожара на автомобиле [10] и актуализировало решение научно-прикладной задачи контроля и диагностирования пожарно-аварийных режимов эксплуатации нейтрализаторов безразборным способом на основе изучения (исследования) закономерностей термической динамики (кинетики) физико-химических процессов.

Подходы, методы и результаты

Транспорт является носителем пожароопасной нагрузки, к которой следует отнести легковоспламеняющиеся горюче-смазочные материалы, элементы изоляции электропроводки, защитные кузовные покрытия. Топливно-каталитические системы («*common rail*», *CRT*, *SCR*, – *system*») [7–10] представляют собой устройства повышенной сложности, отказы которых способны привести к перегреву КН и превратить его в источник воспламенения как элементов пожарной нагрузки автомобиля, так и окружающих предметов, например, сухой травы под днищем кузова автомобиля (рис. 1).



Рис. 1. Места выгорания пластиковой защиты и изолирующего от шума покрытия кузова автомобиля *Skoda Yeti* – показано в красном круге. Источник воспламенения КН показан белой стрелкой (<http://avtotehexpert.ru/nashi-avtoekspertizy/vozgoranie-avtomobilya-ot-katalizatora-99/>)

Прогнозирование и предупреждение возгораний автомобилей от КН возможно только на основе изучения термической динамики (кинетики) процессов конверсии химических веществ отработавших газов (ОГ) на катализаторе двигателя [7–9]. Предлагаемая авторами аналитическая модель, описывающая процессы накопления и преобразования тепла в окислительно-восстановительных КН, основана на теории гетерогенного катализа. Уравнениями теплофизики и кинетики выражаются тепловой и материальный балансы обобщенного процесса.

Баланс тепла для газовой субстанции:

$$\bar{u}\rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial x} = -\frac{\alpha}{R_\Omega} (T_g - T_s),$$

где \bar{u} – усредненная скорость потока реагирующих веществ ОГ в канале реактора, м/с; ρ_g – плотность ОГ, кг/м³; c_{pg} – удельная теплоемкость ОГ, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$; T_g – температура ОГ, К; T_s – температура катализатора, К; α – коэффициент теплоотдачи потоку ОГ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{с}}$; R_Ω – эффективный поперечный размер канала реактора.

Баланс тепла для твердой субстанции катализатора:

$$\delta_s \rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \delta_s \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial l^2} + (-\Delta H_R) a_c R_v(C_s, T_s) \delta_c \eta - \alpha (T_s - T_g),$$

где δ_c – эффективная глубина проникновения реакции в толщу каталитического слоя, м; δ_s – эффективный поперечный размер стенки канала, м; ρ_s – плотность твердого катализатора, кг/м³; c_{ps} – удельная теплоемкость катализатора, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; λ_s – теплопроводность катализатора, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$; ΔH_R – энтальпия химической реакции, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$; a_c – удельная активность катализатора – внутрипоровая площадь активного слоя катализатора на единицу его объема, м²/м³; $R_v(C_s, T_s)$ – скорость гетерогенной реакции в единице объема катализатора; C_s – концентрация реагирующих веществ в пограничном с поверхностью катализатора, слое ОГ, моль/м³; η – коэффициент эффективности каталитического слоя.

Уравнения вещественного баланса для газовой и твердой субстанций:

$$\bar{u} \frac{\partial C_g}{\partial l} = -\frac{k_c}{R_\Omega} (C_g - C_s) = a_c R_v(C_s, T_s) \delta_c \eta,$$

где k_c – коэффициент переноса массы, моль/м²; C_g – концентрация вещества в газовой субстанции, моль/м³.

Концентрации реагирующих веществ в каталитическом слое описываются выражениями:

$$D_e \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = a_c R_v(C_s, T_s) \text{ при } 0 < y < \delta_c;$$

$$C = C_s \text{ при } y = \delta_c, \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0,$$

а фактор эффективности:

$$a_c R_v(C_s, T_s) \delta_c \eta = -D_e \frac{\partial C}{\partial y} \text{ при } y = 0,$$

где D_e – коэффициент эффективного проникновения реагирующего вещества в толщу катализатора.

Модель работает при соблюдении начальных и граничных условий:

$$T_g = T_{g,in}(t) \text{ при } x = 0; C_g = C_{g,in}(t) \text{ при } l = 0;$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial l} = 0 \text{ при } l = 0, L;$$

$$T_s(l) = T_{s,init} \text{ при } x = 0,$$

где $T_{g,in}$ – температура ОГ на входе в КН; $C_{g,in}$ – концентрация вещества в субстанции газа на входе в КН.

Процессы переноса с потоком ОГ тепла и массы в локальных масштабах блочного реактора с учетом ламинарного его движения:

$$\alpha = \frac{Nu}{D_h} \lambda_g = \frac{Nu}{4R_\Omega};$$

$$k_c = \frac{Sh}{D_h} D_m = \frac{Sh}{4R_\Omega} D_m,$$

где λ_g – коэффициент теплопроводности в газовой субстанции, Вт/м·К; Nu – число Нуссельта; D_h – гидравлический диаметр канала, м; Sh – число Шервуда; D_m – коэффициент диффузии в объеме в газовом потоке, м²/с.

Предлагаемая математическая модель термической динамики (кинетики) реального процесса гетерогенного катализа обладает универсальностью для всего спектра, нашедшего сегодня на практике, конструктива как для геометрической конфигурации сотовых каналов, так и каталитических покрытий «подложечной» их части при условии соблюдения ограничения $\delta_c \ll R_\Omega$. Следует отметить, что данное условие, исходя из обязательных в реальной практике технологических требований к КН, соблюдается во всех случаях, поскольку δ_c составляет от 10 мкм до 50 мкм, а R_Ω – от 200 мкм до 300 мкм [7–10].

Предлагаемый научный подход, апробированный многолетними авторскими изысканиями [4], позволил разработать и внедрить на практике оригинальные методы и инструментальные технологии безразборной диагностики пожарно-аварийных режимов эксплуатации автомобильных двигателей, оснащенных КН, на основе усовершенствования стандартных процедур ГОСТ 33997–2016 «Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки» [4] (рис. 2).



Рис. 2. Диагностирование пожарно-аварийных режимов работы КН:
 а) контроль исправности КН на станции технического осмотра автотранспорта;
 б) контроль исправности КН на дороге

Выводы

1. Опасность возгорания автотранспорта, исходящая от пожарно-аварийных режимов эксплуатации электронно-управляемых КН его двигателей, явилась следствием обострения глобальной техногенной проблемы изменения климата и ухудшения здоровья населения, подвергаемого воздействию поллютантов.

2. Пожарно-аварийные режимы работы КН обусловлены нарушениями надлежащих условий их эксплуатации, включая требования к качеству технического обслуживания и применяемому моторному топливу.

3. Предложенные авторами теоретические разработки и основанные на них методы безразборной диагностики пожарно-аварийных режимов работы КН позволят предупредить возгорания автомобилей в эксплуатации.

Список источников

1. Гайворонский А.И., Гордин В.М., Марков В.А. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике // *Двигателестроение*. 2022. № 2. С. 4–28. DOI: 10.18698/jec.2022.2.4-28.

2. Методические основы организации экологических зон с низкими выбросами автомобильного транспорта: монография / В.В. Донченко [и др.]. СПб.: Изд-во «Коста», 2023. 264 с.

3. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4.

4. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Информационные процессы в управлении комплексной безопасностью транспорта: стратегическое планирование и моделирование: монография / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 164 с. ISBN 978-5-907489-15-8.

5. Estimating vehicular emission factors and vehicle-induced turbulence: application of an air quality sensor array for continuous multipoint monitoring in a tunnel / H.Y. Song [et al.] // *Atmospheric pollution research*. 2023. Vol. 14. № 7. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101799.

6. Modelling and optimization of emissions in steady state urban traffic networks / M. Aicardi [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55. № 5. P. 31–36. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.635.

7. Chander Shekhar Sharma, Karthik Ramanathan, Wei Li. Post-processing of vehicle emission test data for use in exhaust after-treatment modelling and analysis // *J Automobile Engineering*. 2012. № 226 (6). P. 840–854. DOI: 10.1177/0954407011427812.

8. Karthik Ramanathan, Chander Shekhar Sharma, Chang Hwan Kim. Global Kinetics for Ammonia Formation and Oxidation Reactions in a Commercial Three-Way // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. № 51. P. 1198–1208. DOI: 10.1021/ie2017866.

9. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.] // *Society of Automotive Engineers*. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-1677.

10. Ложкин В.Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // *Пожаровзрывобезопасность*. Т. 31. № 3. 2022. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74.

References

1. Gajvoronskij A.I., Gordin V.M., Markov V.A. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya bezuglerodnyh i nizkouglерodnyh motornyh topliv v usloviyah razlichnyh scenariyv perekhoda k uglерodno-nejtral'noj energetike // *Dvigatелестroenie*. 2022. № 2. S. 4–28. DOI: 10.18698/jec.2022.2.4-28.

2. Metodicheskie osnovy organizacii ekologicheskikh zon s nizkimi vybrosami avtomobil'nogo transporta: monografiya / V.V. Donchenko [i dr.]. SPb.: Izd-vo «Kosta», 2023. 264 s.

3. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4.

4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Informacionnye processy v upravlenii kompleksnoj bezopasnost'yu transporta: strategicheskoe planirovanie i modelirovanie: monografiya / pod obshch. red. B.V. Gavkalyuka. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 164 s. ISBN 978-5-907489-15-8.

5. Estimating vehicular emission factors and vehicle-induced turbulence: application of an air quality sensor array for continuous multipoint monitoring in a tunnel / H.Y. Song [et al.] // Atmospheric pollution research. 2023. Vol. 14. № 7. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101799.

6. Modelling and optimization of emissions in steady state urban traffic networks / M. Aicardi [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55. № 5. P. 31–36. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.635.

7. Chander Shekhar Sharma, Karthik Ramanathan, Wei Li. Post-processing of vehicle emission test data for use in exhaust after-treatment modelling and analysis // J Automobile Engineering. 2012. № 226 (6). P. 840–854. DOI: 10.1177/0954407011427812.

8. Karthik Ramanathan, Chander Shekhar Sharma, Chang Hwan Kim. Global Kinetics for Ammonia Formation and Oxidation Reactions in a Commercial Three-Way // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2012. № 51. P. 1198–1208. DOI: 10.1021/ie2017866.

9. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.] // Society of Automotive Engineers. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-1677.

10. Lozhkin V.N. Teoriya i praktika diagnostiki pozharoopasnyh rezhimov ekspluatatsii kataliticheskikh nejtralizatorov // Pozharovzryvbezopasnost'. T. 31. № 3. 2022. S. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 09.11.2023; одобрена после рецензирования: 20.11.2023; принята к публикации: 23.11.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 09.11.2023; approved after review: 20.11.2023; accepted for publication: 23.11.2023

Информация об авторах:

Гавкалюк Богдан Васильевич, начальник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: rector@igps.ru, SPIN-код: 6390-5867

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN-код: 9496-2451

Information about the authors:

Gavkalyuk Bogdan V., supervisor of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: rector@igps.ru, SPIN: 6390-5867

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN: 9496-2451