

В. Н. ЛОЖКИН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: vnlojkin@yandex.ru)

О. В. ЛОЖКИНА, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: olojkina@yandex.ru)

УДК 678.5

МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА И НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ ПОЖАРНОГО АВТОМОБИЛЯ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Обоснована математическая модель физико-химических процессов, протекающих в оригинальном устройстве. Предложено устройство, позволяющее запастись тепловой энергией отработавших газов в аккумуляторе при работе двигателя пожарного автомобиля на полной мощности и отдавать ее каталитическому нейтрализатору при работе двигателя на средних и малых нагрузках. Показано, что в процессе отдачи тепла обеспечивается поддержание оптимальной температуры нейтрализатора и, как следствие, высокой эффективности процесса катализа. Приведены результаты испытаний и расчетов устройства, разработанного для пожарных автомобилей с двигателями Акционерного общества “Камский автомобильный завод”, подтверждающие эффективность работы нейтрализатора и адекватность математической модели возможности применения для оценки конструктивных параметров устройства.

Ключевые слова: пожарный автомобиль; дизельный двигатель; отработавшие газы; тепловой аккумулятор фазового перехода; каталитический нейтрализатор; физико-химический процесс; математическая модель; эксперимент; расчет; экологический эффект.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.84-91

Арктика представляет собой зону стратегических интересов России в долгосрочной перспективе [1]. Для двигателей пожарных автомобилей, применяемых в Арктической зоне, актуальными техническими задачами, определяемыми документом [2] и требованиями Технического регламента Таможенного союза “О безопасности колесных транспортных средств” (ТР ТС 018/2011), вступившего в силу с 01.01.2015 г., являются утилизация тепла и повышение эффективности каталитической нейтрализации загрязняющих веществ, сбрасываемых в окружающую среду с отработавшими газами (ОГ) [3–16].

Для решения этих задач авторами предложено устройство [17], встраиваемое в выпускную систему двигателя пожарного автомобиля (ПА) вместо глушителя шума (рис. 1).

Устройство состоит (рис. 2) из теплового аккумулятора фазового перехода (ТАФП) и каталитического нейтрализатора (КН) отработавших газов, объединенных в едином цилиндрическом корпусе 1. ТАФП включает входной патрубок 2, диффузор 3 и теплообменник, состоящий из центральной капсулы, выполненной в виде цилиндра, и нескольких коак-

сиально расположенных цилиндрических капсул 4, заполненных теплоаккумулирующим веществом (ТАВ), с образованием между ними кольцевых цилиндрических пустот (зазоров) 5 для прохода ОГ. Цилиндрические капсулы 4 и цилиндрические зазоры 5 имеют одинаковые радиальные толщины. Между цилиндрическим корпусом 1 и теплообменником укладывается слой изоляции 6. КН включает блочную матрицу (реактор) 7, “глухую” полость расширения 8 и выходной патрубок 9.

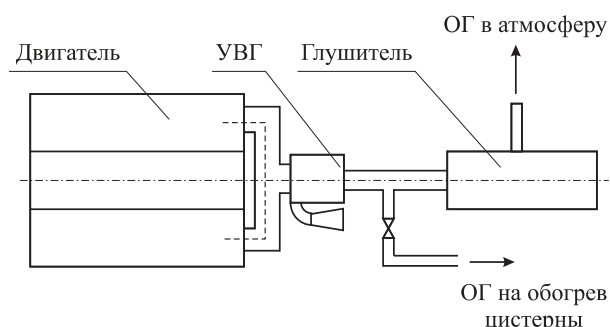


Рис. 1. Схема системы выпуска отработавших газов пожарного автоцистерны

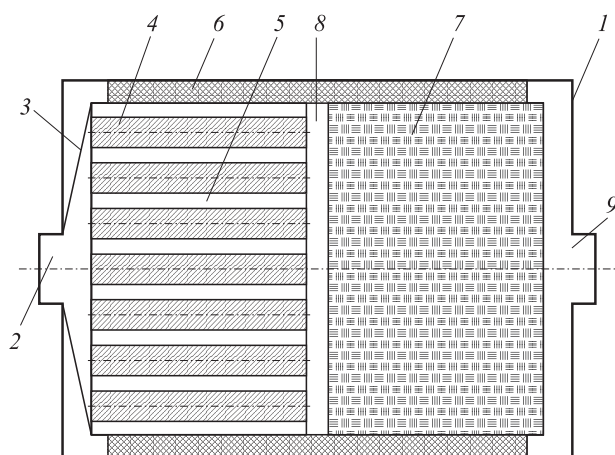


Рис. 2. Принципиальная схема каталитического нейтрализатора, совмещенного с тепловым аккумулятором фазового перехода: 1 — цилиндрический корпус; 2, 9 — входной и выходной патрубки; 3 — диффузор; 4 — цилиндрические капсулы с ТАВ; 5 — кольцевые зазоры; 6 — слой тепловой изоляции; 7 — блочный реактор; 8 — «глухая» полость расширения

Для решаемой задачи моделирования наибольший интерес представляет описание совместной работы ТАФП и КН в режиме «разрядки», т. е. отдачи тепла ОГ, в предположении, что в начальный момент времени $\tau = 0$ в период «зарядки» ТАВ находится в твердом кристаллическом состоянии, а в период разрядки — в жидком. При этом его температура, равная температуре фазового перехода T_ϕ , выровнена по объему.

Уравнение теплового баланса для процесса «разрядки» ТАФП с учетом рассеивания части тепла в окружающую среду можно записать как

$$q_r(\tau) = \eta_{\text{раз}} q_{\text{ТАФП}}(\tau), \quad (1)$$

где $q_r(\tau)$ — тепловая мощность, получаемая потоком ОГ, Вт;

$\eta_{\text{раз}}$ — энергетический КПД процесса «разрядки»;

$q_{\text{ТАФП}}(\tau)$ — тепловая мощность, отдаваемая при разрядке ТАФП, Вт.

Конвективный теплообмен ОГ со стенками капсул ТАФП при $\tau \rightarrow 0$ можно представить выражением

$$q_{\text{ТАФП}}(\tau) = \alpha_r F_{\text{ц}} (T_{\text{ст}}(\tau) - T_{\text{ср}}(\tau)), \quad (2)$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи от стенок капсул к ОГ, Вт/(м²·К);

$T_{\text{ст}}(\tau)$ — температура стенок капсул в момент времени τ , К;

$F_{\text{ц}}$ — суммарная площадь поверхности всех капсул, м²;

$T_{\text{ср}}(\tau)$ — средняя температура ОГ внутри ТАФП в момент времени τ ;

$$T_{\text{ср}}(\tau) = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}(\tau)}{2}; \quad (3)$$

$T_{\text{вх}}, T_{\text{вых}}(\tau)$ — температуры ОГ соответственно на входе и выходе из ТАФП, К.

Очевидными при $\tau \rightarrow 0$ становятся уравнения:

$$q_{\text{ТАФП}}(\tau) = \lambda_{\text{Т}}^{\text{ТВ}} \frac{T_\phi - T_{\text{ст}}(\tau)}{y(\tau)} F_{\text{ц}}; \quad (4)$$

$$q_{\text{ТАФП}}(\tau) = \rho_{\text{Т}}^{\text{ТВ}} r_{\text{Т}} \frac{dy(\tau)}{d\tau} F_{\text{ц}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{Т}}^{\text{ТВ}}$ — коэффициент теплопроводности твердого ТАВ, Вт/(м·К);

T_ϕ — температура фазового перехода, К;

$y(\tau)$ — толщина затвердевшего (превратившегося в кристаллы) слоя ТАВ в момент времени τ , м;

$\rho_{\text{Т}}^{\text{ТВ}}$ — плотность твердого ТАВ, кг/м³;

$r_{\text{Т}}$ — удельная теплота фазового перехода «плавление — кристаллизация», Дж/кг.

Тепловая мощность $q_r(\tau)$ при $\tau \rightarrow 0$ определяется по балансовому уравнению

$$q_r(\tau) = G_r c_r (T_{\text{вых}}(\tau) - T_{\text{вх}}), \quad (6)$$

где G_r — массовый расход ОГ, кг/с;

c_r — удельная массовая теплоемкость ОГ, Дж/(кг·К).

Допускаем, что система уравнений (1)–(6), в которой неизвестными функциями являются $q_r(\tau)$, $q_{\text{ТАФП}}(\tau)$, $y(\tau)$, $T_{\text{вых}}(\tau)$, $T_{\text{ст}}(\tau)$, описывает процесс кристаллизации ТАВ в ТАФП при следующих начальных и граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{ТАФП}}(0) &= q_r(0) = 0 \\ 0 \leq y(\tau) &\leq \delta_{\text{Т}}; y(0) = 0 \\ T_{\text{ст}}(0) &\approx T_\phi \\ T_{\text{вых}}(0) &= T^* \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $\delta_{\text{Т}}$ — «полутолщина» капсулы, м.

Для аналитического решения системы уравнений (7) введем следующие математические соотношения:

- безразмерная температура нагреваемой поверхности капсулы

$$\theta_{\text{ст}} = \frac{T_\phi - T_{\text{ст}}(\tau)}{T_\phi - T_{\text{вх}}}; \quad (8)$$

- средняя безразмерная температура ОГ в полости ТАФП

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{T_\phi - T_{\text{ср}}(\tau)}{T_\phi - T_{\text{вх}}}; \quad (9)$$

- безразмерная температура ОГ на выходе из ТАФП

$$\theta_{\text{вых}} = \frac{T_\phi - T_{\text{вых}}}{T_\phi - T_{\text{вх}}}; \quad (10)$$

- безразмерная толщина затвердевшего ТАВ в режиме чистой (в отличие от конвективной) теплопроводности [18]

$$\Omega = \frac{\alpha_r \gamma(\tau)}{\lambda_T^{TB}}; \quad (11)$$

- безразмерное время

$$t = \frac{\tau(\alpha_r)^2 (T_\phi - T_{вх})}{\lambda_T^{TB} \rho_T^{TB} r_T}; \quad (12)$$

- число теплопередачи

$$N = \frac{\alpha_r F_\Pi}{G_r c_r}. \quad (13)$$

С учетом соотношений (8)–(13) и краевых условий (7) система уравнений (1)–(6) преобразуется до сведения к решению уравнений вида

$$\theta_{ст} = \Omega \frac{d\Omega}{dt}; \quad (14)$$

$$\frac{\theta_{ст}}{\Omega} = \theta_{ср} - \theta_{ст}; \quad (15)$$

$$N\eta_{раз} = \frac{1 - \theta_{вых}}{\theta_{ср} - \theta_{ст}}; \quad (16)$$

$$\theta_{ср} = 0,5 (\theta_{вых} + 1) \quad (17)$$

с начальным условием

$$\Omega = 0 \text{ при } t = 0. \quad (18)$$

Решением системы безразмерных уравнений (14)–(17) становятся функции вида:

$$\theta_{ст} = \frac{2\Omega}{N\eta_{раз} + 2(\Omega + 1)}; \quad (19)$$

$$\Omega = 1/2 \{[(N\eta_{раз} + 2)^2 + 8t]^{1/2} - (N\eta_{раз} + 2)\}; \quad (20)$$

$$\theta_{ср} = \frac{2 + N\eta_{раз} \theta_{ст}}{2 + N\eta_{раз}}; \quad (21)$$

$$\theta_{вых} = \frac{2 - N\eta_{раз} (1 - 2\theta_{ст})}{2 + N\eta_{раз}}. \quad (22)$$

Из анализа структуры функций вытекает важный вывод: процесс кристаллизации ТАВ в режиме чистой теплопроводности, по сути, определяется тремя безразмерными параметрами — t , N и $\eta_{раз}$.

Далее, переходя к объединению физической модели “разрядки” (в ТАФП) с моделью кинетики гетерогенного катализа (в КН), мы имеем возможность рассмотреть любую из “предельных” задач вероятного протекания физико-химического процесса [18]. Применительно к физическим условиям внешнедиффузионной задачи гетерогенного катализа ОГ [18] с учетом принятых допущений нетрудно

получить функциональную связь между температурой стенки канала КН, разностью концентраций реагирующего вещества в “ядре” потока и у активной каталитической поверхности, а также на входе и выходе из КН. Эта зависимость будет связывать практически важные параметры, а именно степень превращения вредных веществ с тепловым состоянием КН:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{ст} = \tilde{T}_{вх} + \frac{q_0}{c_{гV}} \times \\ \times \left[(C_{нач} - C_{вых}) + (C_0 - C_1) \left(\frac{D}{a_r} \right)^{2/3} \right], \end{aligned} \quad (23)$$

где $\tilde{T}_{ст}$, $\tilde{T}_{вх}$ — температуры соответственно стенки канала блочного конвертора и ОГ на входе в КН (на выходе из ТАФП), К;

q_0 — тепловой эффект реакции, Дж/кг;

$c_{гV}$ — удельная объемная теплоемкость ОГ, Дж/(м³·К);

$C_{нач}$, $C_{вых}$, C_0 , C_1 — концентрации реагирующего вещества соответственно на входе в КН, на выходе из КН, в “ядре” потока и у активной поверхности каналов КН, кг/м³;

D — “истинный” коэффициент диффузии, м²/с;

a_r — коэффициент температуропроводности реагирующего вещества, м²/с.

Рассматривая изображенный на рис. 1 КН как теплообменный аппарат, получаем уравнение теплового баланса для всей системы ТАФП–КН:

$$\Delta Q_r = \pm \Delta Q_{ТАФП} + \Delta Q_{кат} - \Delta Q_{пот}, \quad (24)$$

где ΔQ_r — общее количество теплоты, получаемое ОГ в ТАФП–КН за время Δt , Дж;

$\Delta Q_{ТАФП}$ — теплота, отдаваемая ТАФП ОГ при “зарядке” или получаемая ОГ от ТАФП при его “разрядке” за время Δt , Дж;

$\Delta Q_{кат}$ — теплота, выделяющаяся в КН при экзотермическом катализе за время Δt , Дж;

$\Delta Q_{пот}$ — суммарные тепловые потери в системе за время Δt , Дж.

Полученная математическая модель позволяет исследовать и рассчитывать процессы отдачи теплоты и гетерогенного катализа в устройствах, представляющих для двигателя ПА систему ТАФП–КН.

Для проверки ожидаемой эффективности предлагаемого метода утилизации энергии ОГ на ПА были проведены стендовые испытания полноразмерного дизельного двигателя КамАЗ-740.10 (8ЧН 12/12), в выпускную систему которого вместо штатного глушителя шума был установлен КН разработанной конструкции. В табл. 1 сведены характерные результаты испытаний.

Как следует из анализа опытных данных, наиболее низкая степень очистки ОГ от углеводородов C_nH_m и оксида углерода СО наблюдается в режиме холостого хода и малых нагрузок. Это объясняется

Таблица 1. Технические и экологические показатели двигателя КамАЗ-740.10 с КН

Номер режима	N_e , кВт	$n_{дв}$, мин ⁻¹	T_r , К	C_{CH} , млн ⁻¹		η_{CH} , %	C_{CO} , млн ⁻¹		η_{CO} , %	G_r , кг/ч
				до КН	после КН		до КН	после КН		
1	0	800	373	80	80	0	270	210	22	159
2	10,2	1800	433	136	130	4	1230	730	41	531
3	25,4	1800	493	120	115	4	820	620	24	520
4	50,8	1800	573	135	125	7	840	500	41	523
5	76,3	1800	673	165	90	45	930	380	59	513
6	101,7	1800	813	380	100	74	3080	420	86	510
7	0	800	393	105	95	9,5	420	330	21	165
8	122,5	2600	833	386	90	76	1730	290	83	764
9	91,9	2600	738	150	75	50	780	170	78	762
10	61,3	2600	653	114	65	43	720	210	71	756
11	30,6	2600	573	105	75	29	870	180	45	747
12	12,3	2600	523	125	120	4	1110	1050	5	745
13	0	800	413	130	125	4	450	400	11	162

Примечание. N_e — эффективная (эксплуатационная) мощность двигателя; $n_{дв}$ — частота вращения коленчатого вала; T_r — температура ОГ; C_{CH} , C_{CO} — концентрация соответственно углеводородов и оксида углерода в ОГ; η_{CH} , η_{CO} — эффективность очистки ОГ соответственно от углеводородов и оксида углерода.

Таблица 2. Основные теплофизические свойства гидроксида натрия NaOH

Показатель	Значение
Температура фазового перехода “плавление – кристаллизация”, К	572
Удельная теплота фазового перехода, кДж/кг	393
Плотность в твердой фазе, кг/м ³	2130
Плотность в жидкой фазе, кг/м ³	1780

низкой температурой ОГ и, как следствие, “вялым” протеканием химической реакции гетерогенного катализа.

Показательно (см. табл. 1), что путем поддержания температуры ОГ на приемлемом уровне эффективность катализа на кратковременных режимах холостого хода двигателя ПА можно повысить с 4 до 74 % по углеводородам (CH) и с 10 до 86 % по оксиду углерода (CO).

Для проверки адекватности разработанной математической модели выполнены расчеты, конечной целью которых было получение основных геометрических (габаритных) размеров устройства применительно к двигателю ПА.

В основу расчета взяты данные по динамике движения ПА с двигателем КамАЗ-7408.10 в городских условиях (городской цикл движения), на основании которых были оценены вероятные значения температуры и расхода ОГ, характеризующие реальный режим эксплуатации двигателя ПА. По этим физическим параметрам рассчитывался процесс утили-

зации теплоты ОГ в ТАФП с предварительным выбором (подбором) ТАВ (табл. 2).

Например, при температуре окружающего воздуха $T_0 = 253$ К получим $G_r^{расч} = 345$ кг/ч, $T_r^{расч} = 510$ К. Приведение величины $T_r^{расч}$ к температуре $T_0 = 296$ К (для сопоставления с данными табл. 1) осуществлялось с использованием приближенного (эмпирического) соотношения, полученного А. А. Сорокиным [19]:

$$t_{г}^{зим} = \frac{t_{г}^{лет} k_t}{\sqrt{T_0^{лет} / T_0^{зим}}} - (T_0^{лет} - T_0^{зим}), \quad (25)$$

где $t_{г}^{зим}$, $t_{г}^{лет}$ — температуры ОГ соответственно в зимний и летний периоды, °С;

$T_0^{зим}$, $T_0^{лет}$ — температуры окружающего воздуха соответственно в зимний и летний периоды года, К;

k_t — коэффициент, учитывающий увеличение удельного расхода топлива при эксплуатации ПА в зимних условиях.

Например, принимая $k_t \approx 1$, по соотношению (25) получаем: $\hat{T}_r^{расч} = 576$ К при $T_0^{лет} = 296$ К. По значению $\hat{T}_r^{расч} = 576$ К подбирается ТАВ — гидроксид натрия NaOH (см. табл. 2).

Задаемся основными геометрическими параметрами теплообменника по эскизному конструкторскому решению (см. рис. 1): $r_1 = 20$ мм, $r_2 = 25$ мм, $r_3 = 35$ мм, $r_4 = 40$ мм, $r_5 = 50$ мм, $r_6 = 55$ мм, $r_7 = 65$ мм, $r_8 = 70$ мм, $r_9 = 80$ мм, $r_{10} = 85$ мм, $r_{11} = 95$ мм, $r_{12} = 100$ мм (где r_i — расстояние от оси центральной капсулы до цилиндрической поверхности “кольцевой” капсулы, мм).

Таблица 3. Значения параметров теплофизического расчета системы утилизации тепла ОГ двигателя КамАЗ-7408.10 системы ТАФП–КН пожарной автоцистерны

Параметр	$\theta_{\text{вых}}$	$\theta_{\text{ср}}$	Ω	$\eta_{\text{раз}}$	$T_{\text{ст}}, \text{K}$	$F_{\text{ц}}, \text{м}^2$	t	$\tau, \text{с}$	Длина ТАФП, мм
Значение	0,0955	0,547	0,173	0,9	556	1,58	0,314	611	400

Примечание. Отдельные допущения и расчеты, связанные с оценками значений промежуточных параметров по разработанной методике, опускаются авторами по причине их очевидной тривиальности.

Допуская, что при работе двигателя ПА КамАЗ-7408.10 на холостом ходу ТАФП должен подогревать ОГ, поступающие в КН, от $T_{\text{вх}} = 373 \text{ K}$ до $T_{\text{вых}} = 553 \text{ K}$, и очевидным расчетом оценив значение коэффициента теплоотдачи от стенок капсул к ОГ $\alpha_{\text{т}} = 62,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, рассчитываем значения искомых параметров по вышеприведенной методике (табл. 3).

Выводы

1. Разработанная математическая модель физико-химических процессов утилизации тепла ОГ двигателя ПА с целью повышения эффективности нейтрализации (обезвреживания) ОГ в КН адекватна возможности ее применения на практике, в том числе для условий Арктики.

2. Вариантным расчетом по разработанной методике показано, что габаритные размеры ТАФП

практически сопоставимы с размерами штатного глушителя шума двигателя ПА.

3. Принимая во внимание полученные нами ранее данные об акустических параметрах КН для двигателей ПА [20], можно с высокой степенью вероятности предположить, что поставленная задача для Арктики может быть решена конструктивно заменой штатного глушителя шума на разработанную оригинальную систему ТАФП–КН.

Авторы посвящают представляемое ими исследование памяти д-ра техн. наук Василия Валентиновича Шульгина, плодотворно работавшего в нашей совместной научной школе по проблеме применения на пожарных автомобилях тепловых аккумуляторов фазового перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2012 года и дальнейшую перспективу: утв. Президентом РФ 18.09.2008 № Пр-1969. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.05.2016).
2. О долгосрочных перспективах развития системы МЧС России (МЧС-2030): доклад Министра РФ по делам ГО и ЧС В. А. Пучкова 30.10.2012 на заседании Экспертного совета МЧС России. URL: <http://www.region-60.ru/novosti/zhizn/6556029> (дата обращения: 10.05.2016).
3. Ziv A., Berkowicz R., Genikhovich E., Palmgren F., Yakovleva E. Analysis of the St. Petersburg traffic data using the OSPM model // Water, Air and Soil Pollution: Focus. — 2002. — Vol. 2, Issue 5/6. — P. 297–310. DOI: 10.1023/a:1021395620214.
4. Lozhkin V. N., Lozhkina O. V., Ushakov A. Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads // World Applied Sciences Journal. — 2013. — Vol. 23. — P. 96–100. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90020.
5. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2016. — Vol. 47. — P. 251–264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008.
6. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models // Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015. — Vol. 36. — P. 178–189. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.013.
7. Coelho M. C., Fontes T., Bandeira J. M., Pereira S. R., Tchepel O., Dias D., Sá E., Amorim J. H., Borrego C. Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation // Science of the Total Environment. — 2014. — Vol. 470–471. — P. 127–137. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.042.
8. Lozhkin V. N., Lozhkina O. V. Environment safety management of urban road transport. — Saarbrücken, DU: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH and Co., 2011. — 195 p.
9. Cook R., Touma J. S., Fernandez A., Brzezinski D., Bailey C., Scarbro C., Thurman J., Strum M., Ensley D., Baldauf R. Impact of underestimating the effects of cold temperature on motor vehicle start emissions of air toxics in the United States // Journal of the Air & Waste Management Association. — 2007. — Vol. 57, Issue 12. — P. 1469–1479. DOI: 10.3155/1047-3289.57.12.1469.

10. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories // *Atmospheric Environment*. — 2009. — Vol. 43, Issue 15. — P. 2419–2429. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.02.005.
11. De Blasiis M. R., Prete M. Di, Guattari C., Veraldi V., Chiatti G., Palmieri F. Investigating the influence of highway traffic flow condition on pollutant emissions using driving simulators // *Air Pollution XXI: Ecology and the Environment* / Longhurst J. W. S., Brebbia C. A. (eds.). — 2013. — Vol. 174. — P. 171–181. DOI: 10.2495/air130151.
12. Boulter P. G. Environmental traffic management: A review of factors affecting cold-start emissions. TRL Report 270. — Crowthorne : Transport Research Laboratory, 2007. — 60 p.
13. Gkatzoflias D., Kouridis C., Ntziachristos L., Samaras Z. COPERT 5. Computer program to calculate emissions from road transport — User Manual (version 5.0). Published by European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC-ACC), 2016.
14. Hammarström U., Edwards H. Cold Start (Draft). — Linköping : Swedish National Road and Research Institute (VTT), 1997.
15. Reiter M. S., Kockelman K. M. The problem of cold starts: A closer look at mobile source emissions levels // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2016. — Vol. 43. — P. 123–132. DOI: 10.1016/j.trd.2015.12.012.
16. Kim S. R., Dominici F., Buckley T. J. Concentrations of vehicle-related air pollutants in an urban parking garage // *Environmental Research*. — 2007. — Vol. 105, Issue 3. — P. 291–299. DOI: 10.1016/j.envres.2007.05.019.
17. Патент РФ 2204027 С1. МКИ 7F 01 N 3/00. Каталитический нейтрализатор / В. Н. Ложкин, В. В. Шульгин, С. Д. Гулин, Г. М. Золотарев (РФ). — № 2001129630/06; заявл. 01.11.2001; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
18. Ложкин В. Н., Шульгин В. В. Теория и практика применения тепловых аккумуляторов фазового перехода для улучшения экологических и топливно-экономических показателей автотранспортных средств // *Вопросы охраны атмосферы от загрязнения : информ. бюл. № 2 (22)*. — СПб. : НПК “Атмосфера” при ГГО им А. И. Воейкова, 2000. — С. 40–53.
19. Сорокин А. А. Система предпусковой тепловой подготовки двигателей строительных и дорожных машин в условиях отрицательных температур окружающей среды при возведении военно-строительных комплексов : дис. ... канд. техн. наук / Воен. инж.-строит. ин-т. — СПб., 1994. — 158 с.
20. Саватеев А. И. Модификация систем выпуска отработавших газов пожарных автомобилей разогреваемыми каталитическими конверторами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПб. ун-т МВД России. — СПб., 2002. — 25 с.

Материал поступил в редакцию 31 мая 2016 г.

Для цитирования: Ложкин В. Н., Ложкина О. В. Модель устройства утилизации тепла и нейтрализации отработавших газов для пожарного автомобиля северного исполнения // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 84–91. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.84-91.

English

MODEL OF DEVICE FOR STORAGE OF EXCESS HEAT AND FOR NEUTRALIZATION OF EXHAUST GASES OF FIRE TRUCK USED IN ARCTIC ZONE

LOZHOKIN V. N., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Rescue Equipment and Fire Vehicles, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moscovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: vnlozhkin@yandex.ru)

LOZHOKINA O. V., Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Department of Physics and Chemistry of Combustion Processes and Fire Control, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moscovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail address: olozhkina@yandex.ru)

ABSTRACT

There are two actual technical tasks for the engines of the fire trucks which are used in the Arctic zone. The first one is the utilization of heat and the second one is the increase of the efficiency of catalytic neutralization of the exhaust pollutants. The device combining catalytic converter (CC) and mineral heat storage system (MHSS) elaborated for fire trucks may help to solve such problems. The device is supposed to be built in the exhaust system of the engine of the fire truck instead of the noise muffler. It allows to storage the thermal energy of the exhaust gas with the use of heat-retaining substance when the engine operates at full capacity, and to deliver the heat back to the catalytic converter when the engine of the fire truck operates at idling mode. The reverse heat delivery allows maintaining the optimum temperature for the effective catalytic neutralization of exhaust pollutants. The process of the excess heat taking, when the engine operates at a forced mode, may contribute to the increase of the operational life and to the decrease of the risk of inflammation of the engine. Physically and mathematically this process may be described with the use of the thermal balance methodical approach. At the same time, the exothermic process of neutralization may be formalized using the classical Arrhenius kinetics approach, which we previously adjusted for the block-designed catalytic converters. The validity of the mathematical model is confirmed with the test of the fire truck AC 4-40 (43202) equipped with the engine KamAZ-740/10 (8CN 12/12). The experiments have shown that the efficiency of the catalyst at idling operation may be increased from 4 to 74 % with respect to the CH neutralization and from 10 to 86 % in respect to the CO neutralization. The results of calculations have confirmed that the use of the elaborated salt heat storage system with the heat-exchange surface 1.58 m² and the length 400 mm, which can be easily built in the exhaust system of the fire truck instead of the noise muffler, allows to solve the problem of the utilization of the excess heat and the increase of efficiency of catalytic neutralization of the exhaust pollutants of the engines of the fire trucks used in the Arctic zone.

Keywords: fire truck; diesel engine; exhaust gases; mineral heat storage system; catalytic converter; physical-chemical process; mathematical model; experiment; calculations; environmental effect.

REFERENCES

1. The basis of state policy of the Russian Federation in the Arctic Region for the period up to 2012 and in prospect (in Russian). Available at: <http://www.consultant.ru> (Accessed 10 May 2016).
2. About the long-term prospects of the development of the system of EMERCOM (EMERCOM-2030). Report from Ministry of Emercom of Russia V. A. Puchkov on 30.10.2012 (in Russian). Available at: <http://www.region-60.ru/novosti/zhizn/6556029> (Accessed 10 May 2016).
3. Ziv A., Berkowicz R., Genikhovich E., Palmgren F., Yakovleva E. Analysis of the St. Petersburg traffic data using the OSPM model. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2002, vol. 2, issue 5/6, pp. 297–310. DOI: 10.1023/a:1021395620214.
4. Lozhkin V. N., Lozhkina O. V., Ushakov A. Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23, pp. 96–100. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90020.
5. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, vol. 47, pp. 251–264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008.
6. Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, vol. 36, pp. 178–189. DOI: 10.1016/j.trd.2015.02.013.
7. Coelho M. C., Fontes T., Bandeira J. M., Pereira S. R., Tchepel O., Dias D., Sá E., Amorim J. H., Borrego C. Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 470–471, pp. 127–137. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.042.
8. Lozhkin V. N., Lozhkina O. V. *Environment safety management of urban road transport*. Saarbrücken, DU, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH and Co., 2011. 195 p.

9. Cook R., Touma J. S., Fernandez A., Brzezinski D., Bailey C., Scarbro C., Thurman J., Strum M., Ensley D., Baldauf R. Impact of underestimating the effects of cold temperature on motor vehicle start emissions of air toxics in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, vol. 57, issue 12, pp. 1469–1479. DOI: 10.3155/1047-3289.57.12.1469.
10. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories. *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, issue 15, pp. 2419–2429. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.02.005.
11. De Blasiis M. R., Prete M. Di, Guattari C., Veraldi V., Chiatti G., Palmieri F. Investigating the influence of highway traffic flow condition on pollutant emissions using driving simulators. In: Longhurst J. W. S., Brebbia C. A. (eds.). *Air Pollution XXI: Ecology and the Environment*, 2013, vol. 174, pp. 171–181. DOI: 10.2495/air130151.
12. Boulter P. G. *Environmental traffic management: A review of factors affecting cold-start emissions*. TRL Report 270. Crowthorne, Transport Research Laboratory, 2007. 60 p.
13. Gkatzoflias D., Kouridis C., Ntziachristos L., Samaras Z. *COPERT 5. Computer program to calculate emissions from road transport — User Manual (Version 5.0)*. Published by European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC-ACC), 2016.
14. Hammarström U., Edwards H. *Cold Start (Draft)*. Linköping, Swedish National Road and Research Institute (VTT), 1997.
15. Reiter M. S., Kockelman K. M. The problem of cold starts: A closer look at mobile source emissions levels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, vol. 43, pp. 123–132. DOI: 10.1016/j.trd.2015.12.012.
16. Kim S. R., Dominici F., Buckley T. J. Concentrations of vehicle-related air pollutants in an urban parking garage. *Environmental Research*, 2007, vol. 105, issue 3, pp. 291–299. DOI: 10.1016/j.envres.2007.05.019.
17. Lozhkin V. N., Shulgin V. V., Gulín S. D., Zolotarev G. M. *Catalyst converter*. Patent RU, no. 2204027, publ. date 10.05.2003.
18. Lozhkin V. N., Shulgin V. V. *Theory and practice of thermal batteries phase transition to improve the environmental and fuel-economic indicators of motor vehicles*. Saint Petersburg, NPK “Atmosfera” pri GGO im A. I. Voeykova Publ., 2000, no. 2 (22), pp. 40–53 (in Russian).
19. Sorokin A. A. *System of prestart engine starting preparation of road building machines in conditions of negative temperatures of the environment during the construction of military building complexes*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 1994. 158 p. (in Russian).
20. Savateev A. I. *Modification of the system of exhaust fire trucks warmed up by catalytic converters*. Abstr. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2002. 25 p. (in Russian).

For citation: Lozhkin V. N., Lozhkina O. V. Model of device for storage of excess heat and for neutralization of exhaust gases of fire truck used in Arctic zone. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 84–91. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.84-91.