

Показатели функционирования каталитического нейтрализатора в условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля



Л. С. Трофимова,
д-р техн. наук, заведующий
кафедрой «Организация
перевозок и безопасность
движения» Сибирского
государственного
автомобильно-дорожного
университета,



А. В. Залознов,
управляющий
ООО «Комплекс
на Комарова»

Изучение практики эксплуатации автомобильных двигателей, оснащенных каталитическими нейтрализаторами, в условиях пуска и последующего прогрева в холодных температурах окружающего воздуха показывает увеличение выбросов вредных веществ, значения которых не определены для реальных условий.

Автомобильный транспорт эксплуатируется в разных условиях, среди которых наиболее тяжелыми являются отрицательные температуры окружающего воздуха, а также продолжительные периоды работы двигателей на низкой частоте вращения коленчатого вала и короткие дистанции пробегов [1]. Перечисленные условия, влияющие на количество выбросов вредных веществ, в полной мере наблюдаются в городах в зимнее время года.

Проведенные аналитические исследования показали, что утвержденные государством методики для определения экологических показателей функционирования каталитических нейтрализаторов в условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля используют

лабораторные условия, которые значительно отличаются от реальных условий эксплуатации.

В результате выполненных исследований предложена система «Условия запуска холодного двигателя — Автомобиль — Экологические показатели, достигаемые при выходе из каталитического нейтрализатора отработанных газов», позволяющая определить характеристики функционирования каталитического нейтрализатора в реальных условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля. Этот подход позволяет установить взаимосвязи между действительными природно-климатическими условиями запуска двигателя с его характеристиками и результатами работы каталитического нейтрализатора.



Общая схема подключенных приборов в экспериментальной установке

Результаты изучения ранее выполненных научных исследований

Изучив воздействие низких температур окружающего воздуха, Л. Г. Резник и С. А. Эртман установили закономерности изменения времени прогрева двигателей и обосновали необходимость учета влияния суровых зимних условий на характеристики автомобиля.

Сегодня в системах очистки отработавших газов современных двигателей внутреннего сгорания для категории транспортных средств «М» массово применяются каталитические нейтрализаторы. Они эффективно выполняют свои функции при разогретом реакторе, но практически бездействуют на режимах холодного пуска и прогрева. При этом в климатических условиях Сибири время достижения эффективной работы каталитического нейтрализатора может составлять до 10–15 мин. Влияние низкотемпературных условий эксплуатации на работу автомобилей изучены в исследованиях С. Ю. Коваленко [2].

В исследованиях [3, 4] В. И. Ерохов определил значения и установил закономерность взаимосвязи оксидов азота и сажи, провел расчет выброса вредных веществ и оценил его негативное воздействие на окружающую среду.

Авторы М. Г. Бояршинов и Н. И. Кузнецов [5, 6] выполнили измерения температуры охлаждающей жидкости и элементов выпускной системы легкового автомобиля на минимально устойчивой частоте вращения коленчатого вала. Исследования касались решения проблемы образования повышенного количества конденсата в системе выпуска отработанных газов автомобиля при пониженной температуре окружающего воздуха.

Определению показателей функционирования каталитических нейтрализаторов с использованием экспериментальных установок посвящены исследования, проводимые отечественными и зарубежными учеными и практически-работниками.

В работе [7] использовался ионизационно-плазменный метод определения содержания оксида углерода в автомобилях, оснащенных каталитическими нейтрализаторами. Установлена величина от 0,7 до 1 %. Экспериментальные исследования выполнялись для оценки применимости нейтрализаторов.

Авторы И. Н. Кирышин, А. С. Куранов, М. П. Шабанкин [8] выполнили экспериментальные исследования на легко-

вом автомобиле KIA Ceed JD Wagon 1.6 GAS AT 2WD в лабораторных условиях при температуре окружающего воздуха 22 °С, относительной влажности воздуха 58 %, атмосферном давлении 744 мм рт. с. Определены показатели токсичности отработавших газов.

В работе [9] О. В. Ложкина, И. А. Онищенко проводили исследования в климатических условиях Арктики и установили, что для автомобилей с бензиновыми двигателями экологических классов Евро 3, Евро 4 и Евро 5 при температуре –20 °С количество СО, эмитируемое за время прогрева двигателя в 12,8, 14,9 и 34,5 раза выше соответственно, чем при 23 °С; количество СН — выше в 35,6, 40,8 и 49,2 раза соответственно.

Авторы Z. Zhang, J. Hu, D. Tan и др. [10] исследовали показатели работы каталитизатора с точки зрения общего содержания вредных выбросов при фиксированных значениях удельного расхода топлива в процессе торможения автомобиля.

В источнике [11] В. Du, L. Zhang, Y. Geng, Y. Zhang и др. изучали экологические показатели работы каталитического нейтрализатора при холодном запуске двигателя и различной манере вождения автомобиля.

Авторы Ю. В. Баженов, В. П. Каленов [12] провели экспериментальные исследования двигателя BA3-21179 автомобиля LADA и предложили алгоритм диагностики показателей токсичности отработавших газов по их средним значениям.

Следует отметить, что в ранее выполненных исследованиях не изучались вероятностные экологические показатели, достигаемые при выходе из каталитического нейтрализатора отработавших газов, в реальных условиях эксплуатации легкового автомобиля при холодном запуске двигателя.

Цель исследования — определение вероятностных показателей функционирования каталитического нейтрализатора в условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля. Научная новизна состоит в определении статистических значений массы СО и СН в отработанных газах двигателя, расхода топлива и воздуха, времени и температуры начала работы каталитического нейтрализатора в результате экспериментальных исследований функционирования каталитического нейтрализатора в реальных условиях эксплуатации легкового автомобиля.

Система «Условия запуска холодного двигателя — Автомобиль — Экологические показатели»

В выполненных исследованиях авторов установлено, что система «Условия запуска холодного двигателя — Автомобиль — Экологические показатели, достигаемые при выходе из каталитического нейтрализатора отработанных газов» характеризуется вероятностными показателями [13]. В результате экспериментальных исследований доказано, что к ним относятся: масса СО и СН в выхлопных газах двигателя; расход воздуха и топлива; время начала уменьшения СО и СН от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя; температура начала уменьшения СО и СН от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя.

Для определения показателей выполнены натурные наблюдения с применением предложенной авторами [14] экспериментальной установки, при оборудовании которой проведены следующие действия:

- выбран серийно выпускаемый автомобиль Lada Vesta с двигателем BA3-21129, соответствующий современным экологическим требованиям;
- определен комплекс необходимых измерительных приборов: четырехкомпонентный газоанализатор «Инфракар» M3T.01, мотор-тестер GRADE-X с диагностической программой CODE-X, термоэлектрические преобразователи, мультиметр, атмосферный термометр, секундомер, дополнительные средства контроля и приспособления;
- термоэлектрические преобразователи смонтированы в выпускной каталитический коллектор.

Общая схема подключенных приборов в экспериментальной установке представлена на рисунке.

Для определения показателей использовались методы теории вероятностей и математической статистики. Статистическая проверка гипотезы о принадлежности опытных данных к вероятностному закону распределения с доверительной вероятностью 95 % выполнялась с применением поинтервальной оценки. Выполнены вычисления статистических поинтервальных частот попадания случайной величины в интервалы, значения показателей для середины интервалов, плотности распределения для централизованных и нормированных случайных величин,

Таблица 1. Характеристики вероятностного показателя расхода воздуха l

Показатель	Величины показателей по интервалам минусовых значений температуры окружающего воздуха в зимние месяцы (°C)				
	-7,500... -11,590	-11,590... -15,680	-15,680... -19,770	-19,770... -23,860	-23,860... -27,950
Минимальное значение расхода воздуха, кг/ч	10,98	10,692	11,376	11,376	11,5
Максимальное значение расхода воздуха, кг/ч	17,2	20,484	22,392	26,676	28,9
Количество наблюдений, ед.	40	69	33	82	82
Количество интервалов, ед.	12	12	12	12	12
Ширина интервала, кг/ч	0,518	0,816	0,918	1,275	1,450
Математическое ожидание логарифма случайной величины расхода воздуха	2,572	2,665	2,687	2,765	2,808
Дисперсия логарифма случайной величины расхода воздуха	0,013	0,033	0,037	0,055	0,063
Среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины расхода воздуха	0,119	0,190	0,202	0,245	0,264
Сумма слагаемых критерия Пирсона	17,940	2,655	0,241	4,863	11,452
Критерий Романовского	1,212	-1,907	-2,400	-1,457	-0,111
Верхняя граница доверительного интервала	13,490	14,912	15,627	16,621	17,406
Нижняя граница доверительного интервала	12,518	13,619	13,593	14,926	15,505

плотности распределения случайных величин, теоретических чисел попадания в интервалы. Проверка правдоподобия гипотез о принадлежности опытных данных к логарифмически нормальному закону распределения с доверительной вероятностью 95 % осуществлялась по критериям Пирсона и Романовского.

Результаты изучения ГОСТ 16350-80 «Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей» показали, что г. Омск относится к умеренно холодному климатическому району. Средняя температура окружающего воздуха в зимние месяцы составляет -7,5...-27,9 °C. С учетом этих показателей установлены температурные интервалы, для которых определены значения вероятностных показателей. Количество и шаг интервалов определены с использованием формул теории вероятностей и математической статистики. Установлено, что количество интервалов — 5, шаг изменения для температуры окружающего воздуха в зимние месяцы — 4,09 °C. Значения вероятностных показателей представлены для следующих интервалов минусовых значений температуры окружающего воздуха в зимние месяцы, °C: -7,500...-11,590, -11,590...-15,680, -15,680...-19,770, -19,770...-23,860, -23,860...-27,950.

В результате натурных наблюдений с использованием установки зафиксированы значения показателей, выполнена обработка статистических данных, получены верхние и нижние значения вероятностных показателей. В исследовании учитывается время начала работы каталитического нейтрализатора в условиях открытого хранения автомобиля.

В табл. 1 представлен пример расчета характеристик вероятностного показателя расхода воздуха l .

Функция распределения расхода воздуха по логарифмически нормальному закону для интервалов температуры окружающего воздуха в зимние месяцы содержит всю информацию о случайной величине и однозначно ее определяет:

$$-23,860...-27,950\text{ °C} - f(l_1) = \frac{1}{l \cdot 0,264 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - 2,808)^2}{2 \cdot 0,264^2}};$$

$$-19,770...-23,860\text{ °C} - f(l_1) = \frac{1}{l \cdot 0,245 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - 2,765)^2}{2 \cdot 0,245^2}};$$

$$-15,680...-19,770\text{ °C} - f(l_3) = \frac{1}{l \cdot 0,202 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - 2,687)^2}{2 \cdot 0,202^2}};$$

$$-11,590...-15,680\text{ °C} - f(l_4) = \frac{1}{l \cdot 0,190 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - 2,665)^2}{2 \cdot 0,190^2}};$$

$$-7,500...-11,590\text{ °C} - f(l_5) = \frac{1}{l \cdot 0,119 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - 2,572)^2}{2 \cdot 0,119^2}}.$$

В табл. 2 приведены значения математического ожидания, верхних и нижних границ вероятностных показателей:

- масса СО (CO_b , CO_n) в выхлопных газах двигателя при работе каталитического нейтрализатора в условиях холодного запуска двигателя, %;
- масса СН (CH_b , CH_n) в выхлопных газах двигателя при работе каталитического нейтрализатора в условиях холодного запуска двигателя, ppm;
- расход топлива (G_b , G_n) при работе каталитического нейтрализатора в условиях холодного запуска двигателя, л/ч;
- расход воздуха (l_b , l_n) при работе каталитического нейтрализатора в условиях холодного запуска двигателя, кг/ч;
- время начала уменьшения содержания СО ($t\text{CO}_b$, $t\text{CO}_n$) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, с;
- время начала уменьшения содержания СН ($t\text{CH}_b$, $t\text{CH}_n$) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, с;
- температура начала уменьшения содержания СО ($T\text{CO}_b$, $T\text{CO}_n$) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, °C;
- температура начала уменьшения содержания СН ($T\text{CH}_b$, $T\text{CH}_n$) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, °C.

Заключение

В результате исследований по определению вероятностных характеристик функционирования каталитического нейтрализатора в системе «Условия запуска холодного двигателя — автомо-

Таблица 2. Значения верхних и нижних границ доверительного интервала вероятностных показателей, математического ожидания функционирования каталитического нейтрализатора в условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля

Показатель	Величины показателей по интервалам минусовых значений температуры окружающего воздуха в зимние месяцы, °С				
	-7,500... -11,590	-11,590... -15,680	-15,680... -19,770	-19,770... -23,860	-23,860... -27,950
Масса СО в выхлопных газах двигателя, %					
СО _в	1,443	1,502	1,812	2,12	2,38
М(СО)	1,21	1,26	1,55	1,84	1,89
СО _н	1,011	1,053	1,319	1,56	1,57
Масса СН в выхлопных газах двигателя, ppm					
СН _в	6,271	6,825	17,281	22,879	36,912
М(СН)	5,67	6,45	15,48	22,06	36,10
СН _н	5,123	6,092	13,864	21,276	35,308
Расход топлива, л/ч					
Г _в	1,349	1,529	1,926	2,258	2,385
М(Г)	1,27	1,38	1,76	2,08	2,18
Г _н	1,187	1,253	1,614	1,924	2,001
Время начала уменьшения содержания СО от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, с					
tCO _в	131,798	153,405	189,610	222,229	235,522
М(tCO)	131,12	152,85	188,53	221,60	234,51
tCO _н	130,450	152,292	187,455	220,981	233,506
Время начала уменьшения содержания СН от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, с					
tCH _в	163,752	202,670	233,117	267,420	299,235
М(tCH)	162,83	201,81	231,52	266,63	298,22
tCH _н	161,915	200,950	229,930	265,844	297,218
Температура начала уменьшения содержания СО (ТСО _в , ТСО _н) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, °С					
ТСО _в	243,434	245,159	248,456	249,683	251,473
М(ТСО)	242,6	244,11	247,37	249,06	250,57
ТСО _н	241,841	243,071	246,299	248,434	249,678
Температура начала уменьшения содержания СН (ТСН _в , ТСН _н) от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, °С					
ТСН _в	309,521	311,481	315,241	316,413	317,131
М(ТСН)	308,66	310,62	313,47	315,62	316,23
ТСН _н	307,802	309,761	311,703	314,837	315,335

биль — экологические показатели, достигаемые при выходе из каталитического нейтрализатора отработанных газов» установлен логарифмически нормальный закон распределения вероятностных показателей: масса СО и СН в выхлопных газах двигателя; расход воздуха; расход топлива; время и температура начала уменьшения содержания СО и СН от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя. Определены доверительные интервалы изменения показателей с вероятностью 0,95.

С помощью экспериментальных исследований установлено, что значения показателей в каждом температурном интервале различны. Масса СО и СН в диапазонах низких температур имеет более высокое значение, чем в диапазоне более высоких температур окружающего воздуха. Температура и время начала

уменьшения содержания СО, СН от первоначальных, измеряемых при холодном запуске двигателя, имеет значения выше в диапазоне температур окружающего воздуха -23,860...-27,950 °С, чем при -7,500...-11,590 °С. Изменение показателей в температурных интервалах происходит скачкообразно, отсутствует монотонный характер.

Результаты настоящих исследований выполнены для дополнения государственных методик по определению значений экологических показателей функционирования каталитических нейтрализаторов, проводимых в лабораторных условиях. Установленные значения показателей могут быть использованы для определения требуемых параметров функционирования каталитического нейтрализатора для условий Сибирского федерального округа (г. Омск).

Источники

1. Залознов А. В. Результаты исследований времени прогрева автомобильных каталитических нейтрализаторов при режимах холодного пуска двигателей // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сборник матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Омск: СибАДИ, 2022. С. 81–86.
2. Курдин П. Г., Кулаков А. Л., Якубович И. А., Коваленко С. Ю. Влияние низкотемпературных условий эксплуатации на работу турбокомпрессоров автомобильных дизелей КАМАЗ // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Двенадцатая междунар. науч.-практ. конф., посвящается 60-летию Оренбургского государственного университета.

- Оренбург: Оренбургский государственный институт менеджмента, 2015. С. 257–261.
3. Ерохов В.И. Экологические показатели современных наземных транспортных средств // Грузовик. 2020. № 9. С. 16–27.
 4. Ерохов В.И. Экологическая безопасность наземных транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3–4(78). С. 103–111. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-103-111.
 5. Бояршинов М.Г., Лобов Н.В., Кузнецов Н.И., Мартемьянов А.О. Температурный режим системы выпуска отработанных газов автомобиля в условиях пониженных температур // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 3. С. 5–16. DOI: 10.15593/24111678/2018.03.01.
 6. Бояршинов М.Г., Кузнецов Н.И. Особенности изменения температуры системы выпуска отработанных газов автомобиля при пониженных температурах окружающего воздуха // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник матер. IV Международ. науч.-практ. конф. Омск: СибАДИ, 2019. С. 111–115.

7. Соломин В.А., Шабанов А.В., Шабанов А.А. и др. Анализ методов и средств экологического контроля выбросов вредных веществ отработавших газов автомобилей // Известия МГТУ МАМИ. 2016. № 4 (30). С. 82–89.
8. Кирюшин И.Н., Куранов А.С., Шабанкин М.П. Результаты исследования токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Матер. XVIII Международ. науч.-техн. конф. Рязань: Рязанский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», 2020. С. 342–346.
9. Ложкина О.В., Онищенко И.А. Методика оценки выбросов опасных компонентов отработавших газов при пуске и прогреве двигателей автотранспортных средств в климатических условиях Арктики // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 3. С. 30–37.
10. Zhang Z., Hu J., Tan D. et al. Multi-objective optimization of the three-way catalytic converter on the combustion and emission characteristics for a gasoline engine // Energy. 2023. Vol. 277. № 127634. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127634

11. Du B., Zhang L., Geng Y. et al. Testing and evaluation of cold-start emissions in a real driving emissions test // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020. Vol. 86. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102447.
12. Баженов Ю.В., Каленов В.П. Оценка эксплуатационной надежности каталитических нейтрализаторов автомобилей // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 11. С. 53–58. DOI: 10.36535/0236-1914-2019-11-10.
13. Трофимова Л.С., Залознов А.В., Трофимов Б.С. Методика для уточнения актуальных экологических показателей функционирования каталитического нейтрализатора в условиях запуска холодного двигателя легкового автомобиля // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3–2(86). С. 57–67. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-3-2(86)-57-67.
14. Zaloznov A., Pevnev N., Trofimova L. Dependences of the warm-up time changes of catalytic converters in the open storage car conditions // MATEC Web of Conferences 341. The VII International Scientific and Practical Conference «ITMTS». 2021. DOI: 10.1051/mateconf/202134100051



Общероссийская общественная организация **РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА**

Академия включает
48 РЕГИОНАЛЬНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ

ДАТА ОСНОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ТРАНСПОРТА:

26 июня 1991 года



Президент Академии:

**А.Т.Н.
АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ МИШАРИН**

СОСТАВ АКАДЕМИИ В 2023 ГОДУ

> 680 УЧЕНЫХ-ТРАНСПОРТНИКОВ:

170 ДОКТОРОВ НАУК

510 КАНДИДАТОВ НАУК

260 ПОЧЕТНЫХ ЧЛЕНОВ РАТ

