

О загрязнении воздуха тепловыми двигателями и их пожарной и экологической безопасности

Рецензия эксперта на статью получена
08.02.2019 [Expert review on the article
received February 8, 2019].

Введение

По обоснованному мнению передовых учёных мира [1, 2], бесконтрольное применение техники и технологий сжигания углеводородов (главным образом в тепловых двигателях) привело к перенасыщению атмосферного воздуха дисперсным «чёрным» углеродом (сажей), что уже создало чрезвычайные ситуации (ЧС) катастрофического роста заболеваемости и смертности населения [2] и глобальную угрозу устойчивому развитию цивилизации на нашей планете, которая связана с общим потеплением климата, особенно в Арктике и Антарктике [1].

В масштабах крупных городских агломераций при неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ) горожане испытывают закономерно повторяемый прессинг опасного воздействия сажи от транспорта с дизельными двигателями — до 5 ПДК_{мр} (рис. 1), а при аварийных технических неисправностях топливной аппаратуры (ТА) или цилиндропоршневой группы даже одного дизельного грузовика непосредственно на автомагистрали — до 35 и более ПДК_{мр} (рис. 2).

Установлено, что частицы дизельной сажи, первоначально имеющие размеры в несколько сотен ангстрем (до 500×10^{-10} м) [3] и развитую физико-химическую активную структуру аморфного углерода, адсорбируют в порах самое опасное по оценке Всемирной организации здравоохранения [2] канцерогенное вещество — бензо(а)пирен ($C_{20}H_{12}$). Частицы, легко поддерживаемые воздушной средой, мигрируя в атмосфере с потоками воздуха до нескольких недель и более [4], беспрепятственно оседают в лёгких людей, на почве и в сельскохозяйственных культурах, вызывая хронические заболевания астмой, ишемии сердца, инсульты, цереброваскулярные недуги и даже онкологи-

Бесконтрольное применение техники и технологий сжигания углеводородов привело к перенасыщению атмосферного воздуха дисперсным чёрным углеродом, что породило катастрофический рост заболеваемости и смертности населения

ческие заболевания [2]. По этой причине для контроля таких чрезвычайных ситуаций Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России осуществляет в режиме реального времени мониторинг и прогнозирование загрязнения воздушной среды в городах [4].

Экспериментально доказано, что в камерах сгорания дизельных двигателей локальные значения температуры пламени достигают величин до 3400 К [5], а при аварийных режимах работы топливной аппаратуры дизельных двигателей с обильным образованием в цилиндрах сажи происходит блокировка активной поверхности пор нейтраллизаторов, сопровождающаяся неуправляемыми процессами повышения противодавления выпуску отработавших газов (ОГ) и, как следствие, разогрева до малинового цвета [6] его внешней обшивки, с высокими рисками возникновения пожара в моторном отсеке. В работе [7] приводятся установленные экспертизой факты возгорания по этой причине транспортных средств и отзыва из эксплуатации ведущими фирмами мира десятков тысяч автомобилей для конструктивных доработок нейтраллизаторов из-за риска возникновения пожаров.

Представляется очевидным, что решение проблемы контроля глобальных, региональных и локальных угроз чрезвычайно опасного загрязнения воздушной

УДК 621.43.06:656(1-21):504.3.054. Научные специальности: 05.04.02, 05.26.02, 05.26.03.

Диагностика пожарной и экологической безопасности тепловых двигателей транспорта

Владимир Н. Ложкин, д.т.н., профессор; Ольга В. Ложкина, к.х.н., доцент; Богдан В. Гавкалюк, к.т.н.; Максим А. Косовец, адъюнктура; Андрей Ю. Пенченков, адъюнктура, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

Приводятся теоретические и экспериментальные обоснования инструментального метода диагностики транспортных дизелей по оптической плотности частиц сажи. Показано, что динамика изменения оптической плотности в цилиндре и на выпуске идентифицируется с пожарно-аварийными режимами работы нейтраллизатора и эмиссией с отработавшими газами канцерогенного «чёрного» углерода (сажа), влияющего на здоровье и изменение климата. Обосновывается процедура контроля пожарно-аварийных режимов в эксплуатации. Анализируются причины, связанные с неисправностями топливной аппаратуры и неудовлетворительным качеством моторного топлива.

Ключевые слова: тепловые двигатели, транспорт, возгорание, чёрный углерод, диагностика.

UDC 621.43.06:656(1-21):504.3.054. Numbers of scientific specialty: 05.04.02, 05.26.02, 05.26.03.

Diagnostics of fire and environmental safety of transport heat engines

Vladimir N. Lozhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Olga V. Lozhkina, PhD, Associate Professor; Bogdan V. Gavkalyk, PhD, Associate Professor; Maxim A. Kosovets, an adjunct student; Andrey Y. Penchenkov, an adjunct student, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

Theoretical and experimental substantiations of the instrumental method for diagnosing transport diesel engines based on the optical density of soot particles are given. It is shown that the dynamics of changes in optical density in the cylinder and on the exhaust is identified with fire-emergency operating modes of the neutralizer and emission with exhaust gases of carcinogenic "black carbon" affecting health and climate change. Substantiates the procedure for monitoring fire and emergency modes in operation. The reasons connected with malfunctions of the fuel equipment and unsatisfactory quality of motor fuel are analyzed.

Key words: heat engines, transport, fire, black carbon, diagnostics.

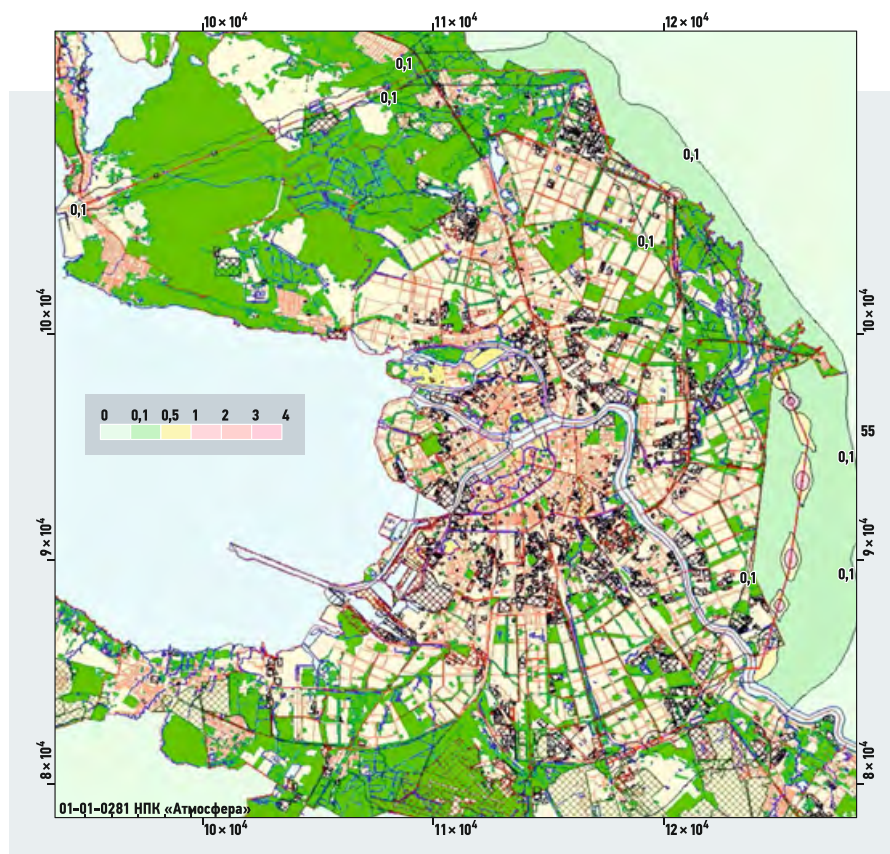


Рис. 1. Карта ожидаемого загрязнения воздуха частицами сажи дизельных автомобилей при НМУ (Санкт-Петербург, часы пик, 2017 год, шкала концентраций в долях $ПДК_{МР}$)

атмосферы «чёрным» углеродом и снижении пожарного риска возгорания транспортных средств при эксплуатации возможно только на основе разработки и внедрения в единую систему мониторинга наукоёмких методов технической диагностики реальных явлений и процессов, их порождающих.

В настоящей статье предлагается разработанный авторами весь комплекс инструментально-расчётной диагностики иерархически связанных между собой физико-химических процессов: образования в первоисточнике (цилиндры дизеля), эмиссии (транспортные средства), миграции в стратифицированной атмосфере на локальном (магистраль), региональном (крупный город) и глобальном (включая арктический континент) уровнях частиц сажи («чёрного» углерода).

Объекты исследования

Объекты исследования выстроены в соответствии с уровнями соподчинённой иерархии (последовательности) проведения диагностических исследований. Ими являются: рабочие процессы сгорания дизельных двигателей — источников образования частиц сажи (первый уровень); регенерируемые керамические сажевые фильтры и каталитические окислительные нейтрализаторы, в которых частицы сажи фильтруются и выжигаются с выделением большого количества тепла,

Для разработки комплекса инструментально-расчётной диагностики объекты исследования были разделены на четыре уровня и выстроены в соответствии с последовательностью проведения диагностических исследований

способного спровоцировать возгорание транспортного средства (второй уровень); двигатели и транспортные средства с дизельными двигателями, передвигающиеся в потоках городских магистралей, каждый из которых является передвижным источником выброса частиц сажи и одновременно источником вероятной пожарной опасности в городе (третий уровень, рис. 2); наконец, участки городских магистралей, улиц, отдельные элементы улично-дорожной городской сети (УДС) и, в целом, вся УДС города, в пределах которых передвигаются автомобили с дизельными двигателями как объекты негативного воздействия на окружающую среду и человека частиц сажи («чёрного» углерода) — четвёртый уровень, рис. 1.

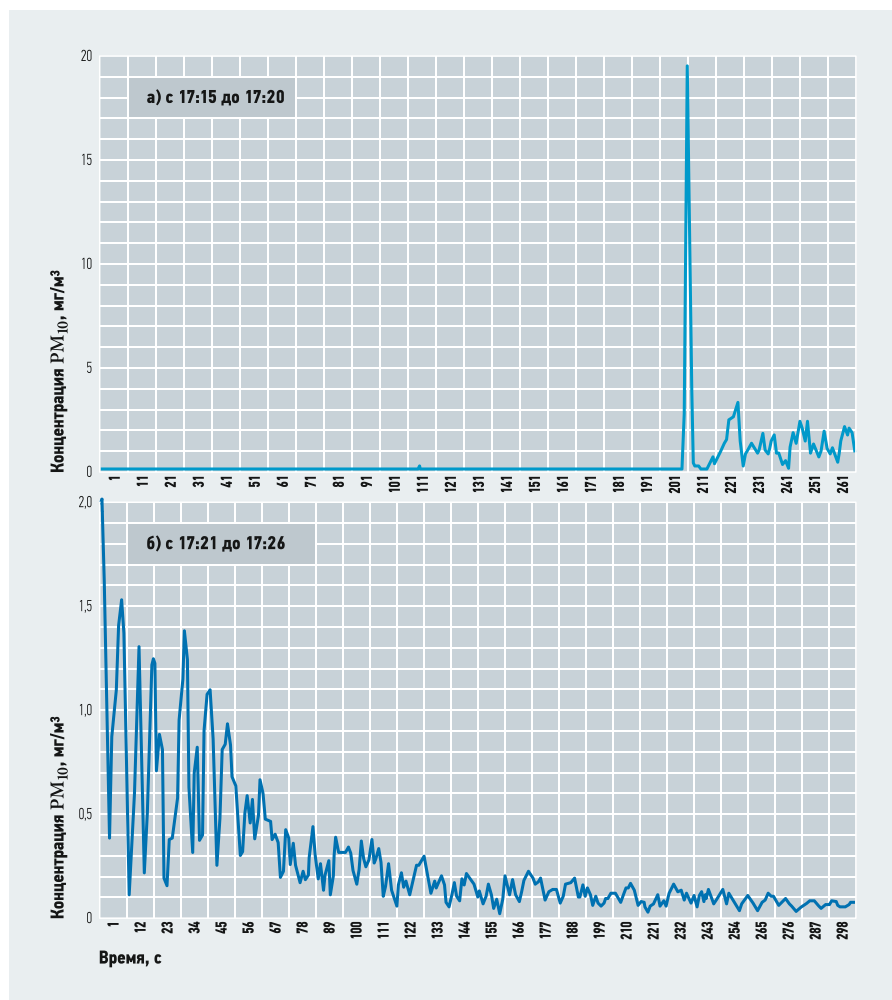


Рис. 2. Измерения концентрации PM_{10} на КАД 28 июля 2017 года

Методика и результаты инструментально-диагностических исследований

Первый уровень: исследования явления образования частиц сажи в цилиндрах дизелей. Для диагностики внутрицилиндровых процессов образования частиц сажи был разработан метод [3, 5], который мы назвали «оптическим (или лазерным) индицированием» и применили впервые во всём мире в 1970-х годах для изучения динамики процесса образования сажи и важнейшей для его протекания характеристики — температуры, развиваемой непосредственно в локальных областях дизельного пламени, в которых и происходит пиролиз топлива.

Метод основан на использовании оптических характеристик частиц дизельной сажи поглощать и излучать электромагнитные волны в видимой части спектра. Для моделирования результата процессов образования и выгорания частиц сажи, выражаемого текущей концентрацией частиц через величину ослабления ими света стороннего источника, применялся известный закон поглощения Бугера-Ламберта-Бера [3].

Для измерения и расчётного моделирования текущей температуры пламени мы использовали широко известный в металлургии «цветовой» метод, основанный на фиксации разности интенсивностей излучения света частицами сажи на двух длинах волн видимого диапазона [5]. Диагностика текущих значений (по углу поворота коленчатого вала) средней «оптической» концентрации частиц сажи и их «цветовой» температуры в самых высоко нагретых локальных частях пламени производилась путём раздельной фиксации на выходе из цилиндра интенсивностей излучения стороне-

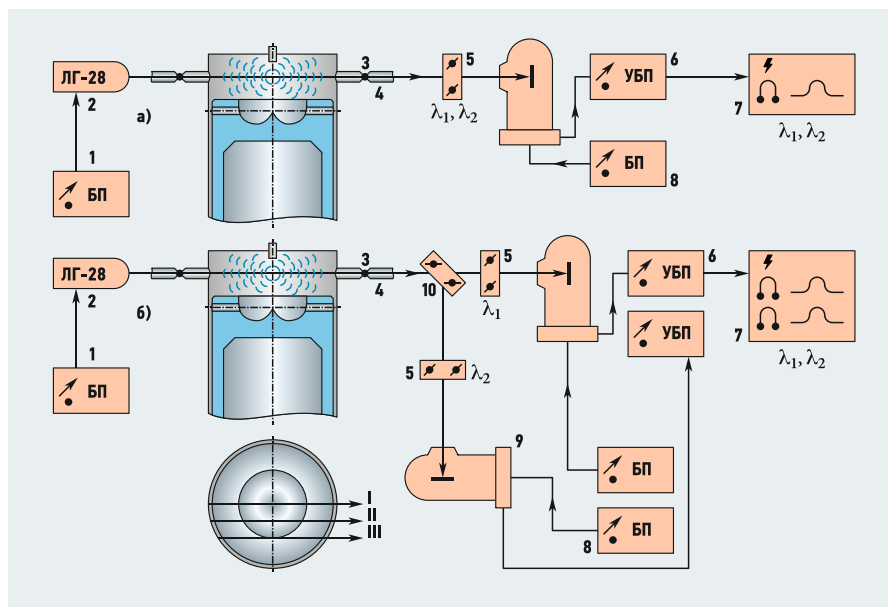


Рис. 3. Функциональная блок-схема оптического индицирования дизеля (а — одноканальная система регистрации излучения; б — двухканальная система регистрации излучения)

го источника плюс излучения частицами сажи и, собственно, излучения частицами сажи на двух длинах волн.

В качестве стороннего источника монохроматического излучения света использовался оптический квантовый генератор (лазер); для прецизионного вычленения из непрерывного спектра излучения частицами сажи нужных электромагнитных частот применялись оптические интерференционные монохроматические фильтры; в качестве приёмников ослабленного сажевым облаком света лазера и света частиц сажи — фотоэлектронные многокаскадные умножители (приборы электровакуумного типа); «окна» в камеру сгорания, в зависимости от конкретных задач диагностики, выполнены из кварца для исследований излучения частиц сажи в видимой области спектра, а также из искусственного сапфира — для исследования генерируемого частицами сажи мощного теплового ИК-излучения [3, 5].

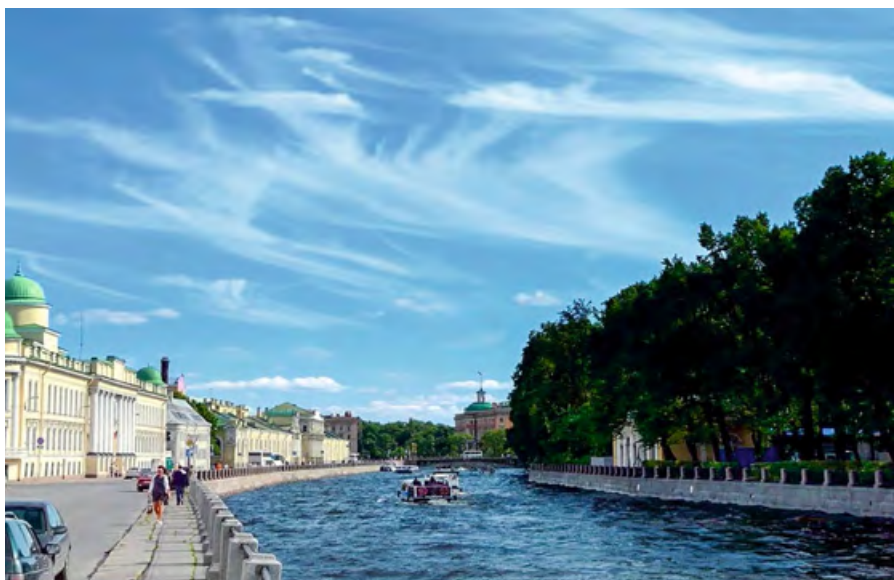
В отличие от более ранних исследований, проводимых в МАДИ В.З. Маховым, автором настоящей статьи, и С.А. Батуриным, как отмечено выше, применялся лазер с длиной волны 630 нм (рис. 3).

Высокая монохроматичность и спектральная мощность (10^{12} – 10^{16} Вт/см²; для сравнения — мощность в оптическом диапазоне дуговой сварки — 10^5 Вт/см², электронного луча — 5×10^8 Вт/см²), когерентность и узкая направленность луча данного лазера (630 нм) в сравнении с другими источниками, применяемыми для определения относительной концентрации частиц сажи, позволили:

- повысить точность измерения за счёт устранения шумов, связанных с хроматической аберрацией, и сведения до минимума погрешностей вследствие немонахроматичности системы;
- проводить исследования в условиях повышенного выделения сажи, что особенно важно при изучении переходных режимов работы дизелей;
- сравнительно легко осуществлять настройку оптической оси между источником и приёмником излучения.

Для исследования процессов образования и выгорания частиц сажи, зависимости «оптической» концентрации сажи с учётом меняющегося объёма над поршнем преобразовывались в зависимости изменения относительного содержания сажи N в цилиндрах дизеля по углу поворота коленчатого вала α (рис. 4).

Как видно, реализация разработанного диагностического метода лазерного индицирования даёт возможность проводить наблюдение результирующего процесса образования частиц сажи в мгновенно протекающем процессе рабочего цикла дизельного двигателя с момента воспламенения топлива до открытия выпускных



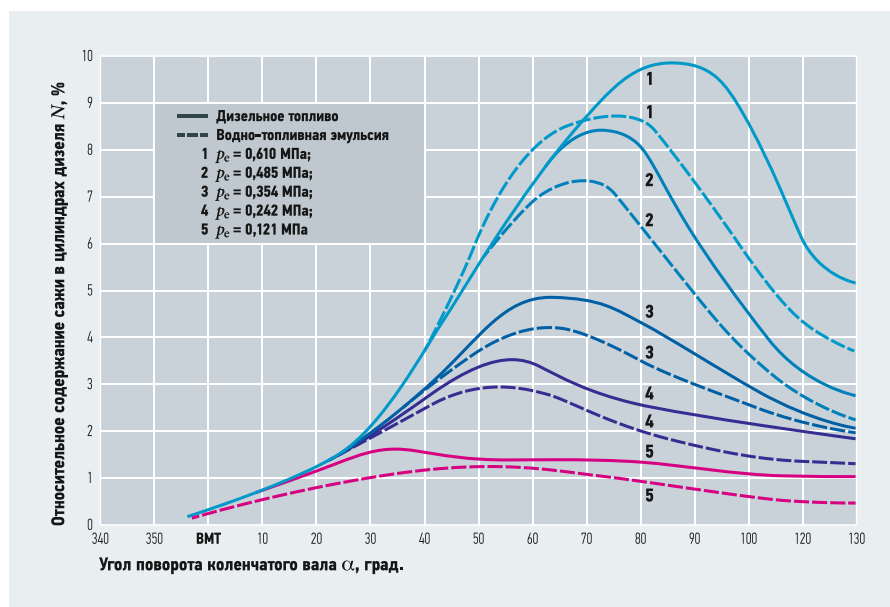


Рис. 4. Влияние присадки воды к топливу на закономерности образования сажи в цилиндре (в единицах условной массы, дизель 8ЧН13/14, $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$)

клапанов. Анализ характера экспериментальных кривых выделения (накопления) сажи, являющегося результатом одновременно идущих процессов образования частиц сажи и их выгорания в объеме цилиндра, позволяет сделать важные для понимания и организации рабочего процесса выводы о том, что быстрое сгорание хорошо подготовленной смеси сразу после воспламенения обуславливает и высокую скорость образования сажи в диффузионном пламени, которая значительно превосходит скорость её выгорания.

Для исследования процессов образования и выгорания частиц сажи, зависимости «оптической» концентрации сажи с учётом меняющегося объёма над поршнем двигателя преобразовывались в зависимости изменения относительного содержания сажи в цилиндрах дизеля по углу поворота коленчатого вала

В дальнейшем развитии результирующего процесса накопления сажи в цилиндрах дизеля ЧН24/36 отчётливо наблюдается преобладание скорости выгорания сажи над скоростью её образования. К концу сгорания последних порций топлива образование сажи прекращается, а выгорание её продолжается вплоть до открытия выпускных клапанов. В данном конкретном примере этот метод даёт возможность оценить влияние на процесс накопления сажи нагрузочного p_c и скоростного n режима работы дизеля; позволяет практически увидеть и оценить, путём сравнения качественных и коли-



чественных закономерностей изменения скорости накопления в цилиндре массы частиц сажи, положительное влияние добавки к дизельному топливу воды (в виде водно-топливной эмульсии — по массе воды 17 % к дизельному топливу) на подавление процесса образования частиц сажи и уменьшения скорости роста её общей массы (закономерности, обозначенные на рис. 4 пунктирными линиями).

Следует отметить, что применение столь сложных для реального дизелестроения методов и диагностического оборудования было естественным явлением, поскольку в те времена в России для создания конкурентных «прорывных» технологий в технике [3, 5] приветствовались междисциплинарные исследования на стыке разнопрофильных фундаментальных и прикладных наук. Сегодня подобные и более изощрённые методы и инструментальные средства применяются в диагностическом оборудовании последних поколений, производимом специализированными зарубежными фирмами.

Отечественной промышленностью, по известным причинам, они в настоящее время не производятся.

Второй уровень: исследование и диагностика пожарно-взрывоопасных режимов эксплуатации, регенерируемых керамических сажевых фильтров и каталитических окислительных нейтрализаторов (КН) частиц сажи и ОГ дизелей.

В течение последних трёх десятилетий авторами статьи разрабатывались и внедрялись в эксплуатацию дизелей отечественного и зарубежного производства сажевые керамические фильтры и каталитические окислительные нейтрализаторы ОГ. Как было отмечено, при аварийных режимах работы этих устройств в процессах каталитической нейтрализации и ре-

генерации от сажи (углерода) развиваются высокие температуры, способные привести к пожару на транспортном средстве.

Перенос тепла внутри пористой катализатора через модельную условную поверхность при каталитической реакции окисления сажи [6] определялся по следующему уравнению:

$$D_{\text{эф}} \frac{dc}{dl} \Delta H = \lambda \frac{dT}{dl} D_{\text{эф}} \frac{dc}{dl} \Delta H = \lambda \frac{dT}{dl}, \quad (1)$$

после его интегрирования:

$$\Delta T = T - T_1 = \frac{(-\Delta H) D_{\text{эф}}}{\lambda} (c_1 - c), \quad (2)$$

где T — температура в любой точке активного слоя, К; c — концентрация реагента в той же точке, моль/м³; ΔH — изменение энтальпии при каталитической реакции, кДж/моль; λ — коэффициент теплопроводности пористой структуры катализатора, Вт/(м·К); c_1 и T_1 — значения, соответственно, концентрации частиц сажи [моль/м³] и температуры [К] на внешней поверхности активного слоя;



$D_{эф}$ — эффективный коэффициент диффузии, определяемый таким образом, чтобы уравнение диффузии частиц сажи для массы пористого слоя имело вид:

$$\frac{dc}{dl} = D_{эф} \Delta c - W'(c), \quad (3)$$

где c — концентрация частиц сажи в некоторой точке внутри массы пористого слоя катализатора; Δ — оператор Лапласа; W' — эффективная скорость реакции, определяемая «истинной» кинетикой; k' — константа «псевдообъёмной» [7] реакции, определяемая зависимостью Аррениуса. При этом перенос реагирующих веществ и продуктов реакции внутри пор допускался молекулярно-конвективной, кнудсеновской и, условно, фольмеровской миграциями газифицированного углерода и кислорода отработавших газов [7].

Расчётными диагностическими исследованиями кинетики и теплофизики процесса гетерогенного катализа было установлено [6, 7], что для технически исправного состояния топливной аппаратуры, например, двигателя КамАЗ-740.10 тепловой эффект в порах каталитических окислительных нейтрализаторов составляет 203–28 167 кДж. Меньшие значения соответствуют режиму холостого хода, большие — режиму номинальной мощности. Как показали расчёты и ходовые испытания КН автотранспорта [6], при неисправности топливной аппаратуры и износе цилиндропоршневой группы тепловые нагрузки могут в десятки раз превышать эти значения, что приводит буквально к «испарению» и «выдуванию» матричного жаропрочного носителя при том, что температура ОГ не превышает значений 500–600 °С.

• • Результаты испытаний [6] автомобиля Ford Mondeo (двигатель TDCi)*

табл. 1

№ изм.	Значение ХМ, м ⁻¹	Среднее значение ХМ, м ⁻¹ (%)	Норма, м ⁻¹ (%)
Измерения дымности ОГ птах.х.х. после регенерации сажевого фильтра			
1	1,65	1,34 (44)	0,4 (15)**
2	1,35	1,34 (44)	*** По ГОСТ 21393–75 для $n_{max,xx}$
3	1,10	1,34 (44)	
4	1,25	1,34 (44)	
Измерения дымности ОГ птах.х.х. на режимах свободного ускорения (СУ)			
1	5,92	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
2	4,28	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
3	3,37	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
4	3,48	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
5	3,73	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
6	3,32	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)

* По диагностике пожарно-аварийными режимами работы регенерируемого сажевого фильтра при неисправном техническом состоянии топливной аппаратуры Common Rail System. ** Условное выражение концентрации частиц сажи в ОГ дизельного двигателя через измеренные значения натурального показателя ослабления светового потока [м⁻¹] и оптическую плотность [%], рассчитанные в соответствии с законом поглощения Бугера-Ламберта-Бера. $n_{max,xx}$ — измерения на режиме максимальных оборотов холостого хода, взят из ГОСТ 23435–79 «Техническая диагностика. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Номенклатура диагностических параметров».





Последующий лабораторный экспертный анализ проб топлива, отобранных из топливного бака и корпуса фильтра тонкой очистки, показал конкретно на данном автомобиле их несоответствие установленным требованиям (содержание воды в топливе, отобранного из корпуса фильтра, составляло 11 %). Для пробы топлива из бака: температура вспышки составляет +27°C вместо +62°C; цетановое число — 40,4 вместо 45; зольность — 0,025 вместо 0,01; присутствие бензиновых фракций и воды более 0,05 % по массе; повышенное содержание меркаптановой серы и сероводорода). Детали ТА имели явно выраженные коррозионные разрушения [6].

Третий уровень: двигатели и транспортные средства с дизельными двигателями. Из теории рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания известно [3], что состав отработавших газов дизелей, в частности, содержание в них частиц сажи в форме дымового аэрозоля, измеряемое по диагностическому параметру

«оптической» плотности (дымности) ОГ, имеет глубинную связь с техническим состоянием систем двигателя, в частности, регулировками топливной аппаратуры и его топливно-экономическими показателями. Это позволило нам разработать метод диагностики перерасхода топлива двигателем транспортного средства и, в целом, парка транспортных средств по результатам измерений дымности ОГ в режиме свободного ускорения (СУ) [8].

Теоретической основой метода является введение понятия об условном среднестатистическом дизельном транспортном средстве при допущениях:

- значение дымности отработавших газов для него на режиме свободного ускорения равно среднестатистическому, то есть математическому ожиданию $m_{K_{cy}}$, выявленному в результате проведения статистических исследований на предприятии, эксплуатирующем транспортную технику;
- расход топлива при его работе G_{ty} устанавливается работой на условном ре-

жиме, определяемом интегральной суммой статистически «взвешенных» во времени эксплуатационных режимов работы дизельных двигателей в условиях реальной эксплуатации.

Таким образом, если применительно к транспортным двигателям обозначить через: β — область эксплуатационных режимов работы дизельных двигателей, определяемых значениями $[M_K, n]$; m — количество режимов, составляющих область β ; $[M_K, n_i]$ — отдельный режим работы дизеля, входящий в область β ; a_i — доля времени (от единицы), в течение которого дизель работает на режиме

Состав отработавших газов дизелей, в частности, содержание в них частиц сажи в форме дымового аэрозоля, измеряемое по диагностическому параметру «оптической» плотности (дымности) отработавших газов, имеет глубинную связь с техническим состоянием систем двигателя, в частности, регулировками топливной аппаратуры и его топливно-экономическими показателями

$[M_K, n_i]$ (целесообразно принять в качестве единицы времени один час, так как расход топлива измеряется в кг/ч); $i = 1, 2, \dots, m$ — индексы режимов, составляющих область β , то тогда при работе дизеля на данном условном среднестатистическом эксплуатационном режиме должно соблюдаться равенство:

$$\sum_{i=1}^m (a_i) = 1 \text{ час.} \quad (4)$$

Обоснование метода производилось для транспортных средств с дизельными двигателями Д-240, для которого время работы на отдельных эксплуатационных режимах, согласно статистике, распределялось следующим образом [8]:

- 0,35–0,55 N_{en} — 42 % времени;
- 0,15–0,55 N_{en} — 29 % времени;
- 0,75–0,95 N_{en} — 29 % времени.

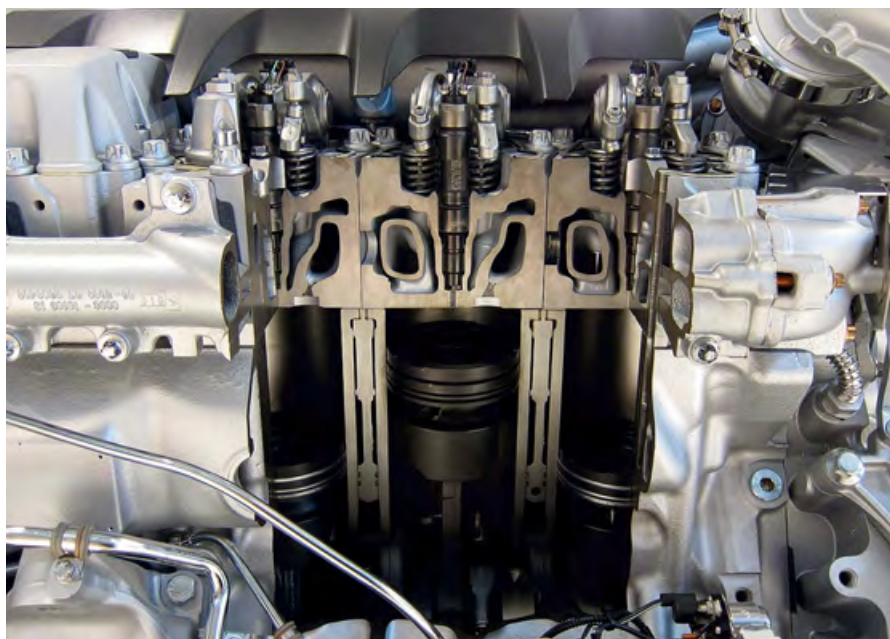
Таким образом, решение поставленной диагностической задачи сводилось к определению зависимости вида:

$$G_{ty} = f(K_{cy}), \quad (5)$$

которая в условиях принятой статистической модели эквивалентна зависимости:

$$G_{ty} = f(m_{K_{cy}}), \quad (6)$$

где $G_{ty} = \sum_{i=1}^m (G_i a_i)$, здесь G_i — расход топлива на режиме $[M_K, n_i]$; $m_{K_{cy}}$ — математическое ожидание дымности на режиме СУ.



Суммарный среднестатистический расход топлива парком транспортных средств предприятия, приведённый к условному эксплуатационному режиму работы транспортного средства, определяется как:

$$G_{\text{тп}} = G_{\text{тп}} A, \quad (7)$$

где A — количество работающих дизельных транспортных средств в парке.

Для выявления зависимости (5) были организованы стендовые моторные исследования дизеля Д-240 [8] при различных комбинациях значений регулировочных параметров топливной аппаратуры, изменявшихся в диапазонах, характерных для реальной эксплуатации.

В результате этих исследований было получено уравнение:

$$G_{\text{тп}} = 0,02 K_{\text{ср}} + 7,64, \quad (8)$$

которое позволяет по дымности отработавших газов в режиме свободного ускорения ($K_{\text{ср}}$) диагностировать расход (или перерасход) топлива транспортными средствами применительно к конкретным условиям их эксплуатации.

Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 19 апреля 2010 года №26 было введено в действие Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест», которым установлены ПДК для взвешенных частиц PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ (табл. 2) [8]. Они не учитывают химический состав частиц.

Поскольку частицы дизельной сажи относятся именно к данному опасному размеру твёрдых частиц, нами были проведены диагностические экспериментальные исследования по выявлению локальных чрезвычайных ситуаций сверхнормативного загрязнения ими воздуха непосредственно на автотранспортной магистрали. Методика диагностики предусматривала проведение непрерывных измерений PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ при движении в потоке автотранспорта и измерений на тротуаре автомагистрали с движущимся автотранспортом. Для этого был использован оптический метод косвенного измерения концентрации частиц дизельной сажи лазерной спектроскопии с детектированием рассеянного света, реализованный в приборе DustTrak 8530 (изготовитель — TSI Inc., США) [4, 8].

Диагностические исследования показали, что такие ЧС возможны не только по причине значительного количества в структуре транспортного потока автомобилей низкого экологического класса, но даже в том случае, если источником экологической опасности оказывается одно транспортное средство с аварийным (неисправным) дизельным двигателем.



Такие чрезвычайно опасные локальные ситуации можно наблюдать не только на дорогах и в городах России, но и за рубежом [2]. При непрерывных измерениях концентраций РМ на дороге периодически появляются пиковые значения концентраций, в три-пять раз превышающие устойчивое фоновое загрязнение, что обусловлено отмеченными выше причинами и турбулентными пульсациями воздушных масс в транспортном потоке.

Методика диагностики предусматривала проведение непрерывных измерений PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ при движении в потоке автотранспорта и измерений на тротуаре автомагистрали с движущимся автотранспортом

Как видно из рис. 2, нам удалось зафиксировать явление аномальной флуктуации в изменении концентрации PM_{10} , физическая природа которого, как оказалось, была связана с проездом рядом с местом измерений дизельного грузовика с аварийным техническим состоянием двигателя, о чём свидетельствовал распространявшийся за ним шлейф плотного чёрного дыма. Анализ рис. 2 доказывает вероятность локального загрязнения воздуха PM_{10} на автомобильной дороге до уровней, в десятки раз превышающих $\text{ПДК}_{\text{мр}}$, и, следовательно, оправданность организации непрерывной диагностики качества атмосферного воздуха непосредственно на проезжих частях автомобильных дорог.

Четвёртый уровень: участки городских магистралей, улиц, отдельные элементы улично-дорожной городской сети (УДС) и, в целом, вся УДС города, в пределах которых передвигаются автомобили с дизельными двигателями.

В процедурно-теоретическую основу разработанных нами в творческом содружестве с учёными и специалистами Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова, НИИ «Атмосферного воздуха», Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого инструментально-расчётных методов диагностики загрязнения атмосферы городов взвешенными в воздухе частицами дизельной сажи, положены реализации, в зависимости от конкретных задач (перекрёсток, магистраль, элемент УДС, город, метеорологические условия и т.п.) [4], численных решений уравнения атмосферной диффузии (9) для средних значений концентраций РМ q:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q, \quad (9)$$

где x и y — оси, расположенные в горизонтальной плоскости; z — ось по вертикали; t — время; u , v и w — составляющие средней скорости витания частиц сажи в стратифицированной атмосфере, соответственно, в направлениях осей x , y и z ; k_x , k_y и k_z — горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента обмена; α — коэффициент, определяющий изменение концентрации за счёт физических процессов коагуляции и гравитационного оседания, вымывания частиц

... Значения предельно допустимых концентраций твёрдых частиц

табл. 2

№ п/п	Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м³		
		макс. разовая	среднесуточная	среднегодовая
1	Взвешенные частицы PM_{10}	0,30	0,060*	0,040
2	Взвешенные частицы $\text{PM}_{2.5}$	0,16	0,035*	0,025

* 99-я процентиль.



сажи осадками, оседания их на почве, поверхности водоёмов, объектов инфраструктуры, зданий и т.п. (с использованием программы «Эколог 4» фирмы «Интеграл», город Санкт-Петербург); с элементами нейронных сетевых математических аппроксимаций результатов и обучения моделей гетерогенными данными измерений автоматизированной системы мониторинга (АСМ) (работает в онлайн-режиме) Комитета по охране окружающей среды и природопользования правительства Санкт-Петербурга [9].

На рис. 1 в качестве примера практической реализации разработанного метода диагностики показана вероятная карта загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга PM_{10} дизельной сажи ОГ двигателей транспортных средств при сочетании неблагоприятных транспортных (часы пик) и метеорологических условий, способствующих накоплению PM_{10} (слабая ветровая нагрузка, наличие инверсий) в приземном слое атмосферы на уровне дыхания человека. Анализ данных рис. 1 показывает, что в окрестности оживлённых городских транспортных артерий при неблагоприятных условиях можно ожидать локальных мест загрязнения воздуха до уровня $5 ПДК_{мр}$.

Выводы

1. Предложена оригинальная методология, способствующая решению проблемы контроля глобальных, региональных и локальных угроз чрезвычайно опасного загрязнения воздушной атмосферы «чёрным» углеродом и снижения пожарного риска возгорания транспортных средств в эксплуатации путём разработки и внедрения в единую систему мониторинга наукоёмких методов технической диагностики реальных явлений и процессов их порождающих.

2. Разработан весь комплекс инструментально-расчётных средств диагностики иерархически связанных между собой физико-химических процессов: образования в первоисточнике (цилиндры дизеля), эмиссии (транспортные средства), миграции в стратифицированной атмосфере на локальном (магистраль), региональном (крупный город) и глобальном (включая Арктику) уровнях, частиц сажи («чёрного» углерода).

Предложена оригинальная методология, способствующая решению проблемы контроля глобальных, региональных и локальных угроз опасного загрязнения воздушной атмосферы «чёрным» углеродом

3. Продемонстрированы возможности положительной реализации разработанной инструментально-расчётной методологии для четырёх уровней соподчинённой иерархии диагностических исследований. Первый уровень — рабочие процессы сгорания дизельных двигателей, как источников образования частиц сажи. Второй уровень — регенерируемые керамические сажевые фильтры и каталитические окислительные нейтрализаторы, в которых фильтруются и выжигаются частицы сажи с выделением большого количества тепла, способного спровоцировать возгорание транспортного средства. Третий уровень — двигатели и транспортные средства с дизельными двигателями, передвигающиеся в потоках городских магистралей, каждый из которых является передвижным источником выброса частиц сажи и одновременно источником вероятной пожарной

опасности в городе. Наконец, четвёртый уровень — участки городских магистралей, улиц, отдельные элементы улично-дорожной городской сети (УДС) и, в целом, вся УДС города, в пределах которых передвигаются автомобили с дизельными двигателями как источники негативного воздействия на окружающую среду и человека частиц сажи («чёрного» углерода).

4. Внедрение методологии в процесс диагностики загрязнения воздушной среды Санкт-Петербурга позволило выявить прецеденты ЧС: при неблагоприятных метеорологических условиях горожане испытывают закономерно повторяемый прессинг опасного воздействия сажи (до $5 ПДК_{мр}$) от транспорта с дизельными двигателями, а при аварийных технических неисправностях топливной аппаратуры или цилиндропоршневой группы (даже одного дизельного грузовика) возможны его возгорание от каталитических нейтрализаторов или сажевого фильтра и локальные загрязнения воздушной среды PM_{10} дизельной сажи отработавших газов до 35 и более $ПДК_{мр}$ непосредственно на самой автомагистрали. •

1. Quinn P.K., Stohl A., Arneth A., Bernsten T., Burkhardt J.F., Christensen J., Flanner M., Kupiainen K., Lihavainen H., Shepherd M., Shevchenko V., Skov H., Vestreng V. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2011. Oslo. 72 p. Web-source: amap.no. Access data: January 10, 2019.
2. Greenstone M., Qing C. Introducing the Air Quality Life Index. Twelve Facts about Particulate Air Pollution. Human Health and Global Policy. Air Quality Life Index. Report. November 2018. Web-source: aqli.epic.uchicago.edu. Access data: January 15, 2019.
3. Ложкин В.Н. Исследование динамики и термических условий сажевыделения при сгорании распылённого топлива в цилиндрах дизелей: Дисс. канд. тех. наук по спец. 05.04.02. — Ленинград: ЛПИ, 1978. 172 с.
4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V., Dobromirov V.N. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well court-yards of St. Petersburg. 13th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018). Transportation Research Procedia. 2018. No. 36. Pp. 453–458.
5. Baturin S.A., Lozhkin V.N., Keiser E. Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnell-drehender Dieselmotoren. Kraftfahrzeugtechnik. 1979. No. 2.
6. Осипов Д.В., Ложкина О.В., Гавкалюк Б.В. К теории пожаровозопасного разогрева каталитических матриц нейтрализаторов, устанавливаемых в транспортных средствах // Проблемы управления рисками в техносфере, 2010. №1. С. 18–27.
7. Осипов Д.В. Методика прогнозирования эффективности и пожарной безопасности нейтрализаторов транспортных средств: Дисс. канд. тех. наук по спец. 05.26.03. — СПб.: СПб УГПС МЧС РФ, 2011. 183 с.
8. Ложкин В.Н., Фомичев А.И., Ложкина О.В. Диагностика экологических и топливно-экономических показателей тракторных и автомобильных двигателей по дымности отработавших газов // Известия Международной академии аграрного образования, 2017. №35. С. 74–79.
9. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Nevmerzhitsky N.V., Tarhov D.A., Vasilyev A.N. Motor transport related harmful $PM_{2.5}$ and PM_{10} : from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 772. No. 1. Web-source: iopscience.iop.org. Access data: January 7, 2019.

References — see page 95.

Diagnostics of fire and environmental safety of transport heat engines. Pp. 80–87.

Vladimir N. Lozhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Olga V. Lozhkina**, PhD, Associate Professor; **Bogdan V. Gavkalyk**, PhD, Associate Professor; **Maxim A. Kosovets**, an adjunct student; **Andrey Y. Penchenkov**, an adjunct student, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

1. Quinn P.K., Stohl A., Arneth A., Bernsten T., Burkhardt J.F., Christensen J., Flanner M., Kuopainen K., Lihavainen H., Shepherd M., Shevchenko V., Skov H., Vestreng V. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2011. Oslo. 72 p. Web-source: amap.no. Access data: January 15, 2019.
2. Greenstone M., Qing C. Introducing the Air Quality Life Index. Twelve Facts about Particulate Air Pollution. Human Health and Global Policy. Air Quality Life Index. Report. November 2018. Web-source: aqli.epic.uchicago.edu. Access data: January 10, 2019.
3. Lozhkin V.N. *Issledovanie dinamiki i termicheskikh uslovij sazhevydeleniya pri sgoranii raspylennogo topliva v cilindrah dizelej* [Investigation of the dynamics and thermal conditions of soot release during the combustion of sprayed fuel in the cylinders of diesel engines]. *Diss. kand. teh. nauk po spec. 05.04.02* [The PhD thesis at the specialty of No. 05.04.02]. Leningrad. LPI [Leningrad Polytechnic Institute named after M.I. Kalinin]. 1978. 172 p. [In Russian]
4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V., Dobromirov V.N. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of St. Petersburg. 13th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018). Transportation Research Procedia. 2018. No. 36. Pp. 453–458.
5. Baturin S.A., Lozhkin V.N., Keiser E. Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnellrehender Dieselmotoren. Kraftfahrzeugtechnik. 1979. No. 2.
6. Osipov D.V., Lozhkina O.V., Gavkaljuk B.V. *K teorii pozharovzryvoopasnogo razogreva kataliticheskikh matric nejtralizatorov, ustanavlivaemykh v transportnykh sredstvakh* [To the theory of fire-explosion heating of catalytic matrices of converters installed in vehicles]. *Problemy upravleniya riskami v tehnosfere* [“Problems of risk management in the technosphere” Magazine]. 2010. No. 1. Pp. 18–27. [In Russian]
7. Osipov D.V. *Metodika prognozirovaniya jeffektivnosti i pozharnoj bezopasnosti nejtralizatorov transportnykh sredstv* [Methods of predicting the effectiveness and fire safety of vehicle neutralizers]. *Diss. kand. teh. nauk po spec. 05.26.03* [The PhD thesis at the specialty of No. 05.26.03]. St. Petersburg. SPb UGPS MChS RF [St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia]. 2011. 183 p. [In Russian]
8. Lozhkin V.N., Fomichev A.I., Lozhkina O.V. *Diagnostika jeologicheskikh i toplivno-jekonomicheskikh pokazatelej traktornykh i avtomobil'nykh dvigatelej po dymnosti otrabotavshih gazov* [Diagnostics of environmental and fuel-economic indicators of tractor and car engines for exhaust smoke]. *Izvestija Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya* [News of the International Academy of Agrarian Education]. 2017. No. 35. Pp. 74–79. [In Russian]
9. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Nevmerzhitsky N.V., Tarhov D.A., Vasilyev A.N. Motor transport related harmful PM2.5 and PM10: from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 772. No. 1. Web-source: iopscience.iop.org. Access data: January 7, 2019.