

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108145>

Оригинальное исследование



Применение топливopодающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду

А.А. Мельберт, Ч.Х. Нгуен, А.В. Машенский

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Загрязнение окружающей среды вызывает целый ряд необратимых последствий, в том числе связанных с потеплением климата, выпадением кислотных осадков, ухудшением климатических условий и т.д. Проблема снижения вредных выбросов дизелей с отработавшими газами является актуальной в настоящее время, так как выполнение стандартов ЕВРО 4/5/6 становится все более сложно как для новой автотракторной техники, так и для уже находящейся в эксплуатации.

Цель исследования. Сокращение вредных выбросов в атмосферу и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду путем увеличения давления впрыска топлива в цилиндре дизеля.

Материалы и методы. Были испытаны дизели 6Ч15/18 (7Д6-150) с номинальной мощностью 110 кВт при 1500 мин⁻¹, удельным эффективным расходом топлива 224 г/(кВт•ч) и угаром масла 0,32% от расхода топлива, предназначенного для дизель-генераторных установок. При испытаниях на установившихся режимах был проведен отбор отработавших газов дизеля на анализ их состава и определение дисперсности твердых частиц (ТЧ) при увеличении давления впрыска топлива затяжкой пружин форсунок.

Результаты. Выявлено, что с увеличением затяжки пружин форсунок и увеличением давления впрыска (P_B) снижаются выбросы твердых частиц с отработавшими газами, и повышается топливная экономичность дизеля. В результате проведенных испытаний обнаружено, что при увеличении затяжки пружин форсунок РВ со 160 до 185 кПа выбросы оксидов азота (NO_x) снижаются на 15%, оксида углерода (СО) на 15%, углеводородов (C_xH_y) на 54%, твердых частиц (ТЧ) на 33%. Изменение выбросов СО при увеличении РВ объясняется улучшением смесеобразования и лучшей подготовкой топлива к сгоранию. Выбросы C_xH_y свидетельствуют о значительном улучшении полноты сгорания топлива в цикле. Выбросы твердых частиц с отработавшими газами снижаются из-за интенсификации смешения воздуха и паров топлива, способствующего более полному выгоранию сажи в цилиндре. Выбросы C_xH_y снижаются и удовлетворяют нормам ЕВРО-3 и ЕВРО-4. Техногенная нагрузка составила $H_{ТН}=51,34$ ут/г при $P_B=160$ кПа и $H_{ТН}=43,66$ ут/г при $P_B=185$ кПа, что свидетельствует о снижении техногенной нагрузки в 1,17 раза или на 15%.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования топливopодающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска топлива в цилиндр для снижения вредных выбросов с отработавшими газами дизелей до требуемых норм.

Ключевые слова: давление; впрыск; топливо; отработавшие газы; дизель; вредные выбросы.

Для цитирования:

Мельберт А.А., Нгуен Ч.Х., Машенский А.В. Применение топливopодающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 325–331. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108145>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108145>

Original Study Article

Use of fuel injection equipment with increased injection pressure for reducing environmental footprint

Alla A. Melbert, Tran Hung Nguyen, Alexander V. Mashensky

Polzunov Altay State Technical University, Barnaul, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Environmental pollution causes a number of irreversible consequences, including those associated with climate warming, acid precipitation, deterioration of climatic conditions and others. The problem of reducing harmful emissions of diesel engines containing in exhaust gases is currently relevant, as the implementation of the EURO 4/5/6 standards is becoming increasingly difficult for both new automotive equipment and those already in operation.

AIMS: Reduction of harmful emissions into the atmosphere and reduction of environmental footprint by increasing the fuel injection pressure in a diesel cylinder.

MATERIALS AND METHODS: The 6Ch15/18 (7D6-150) diesel engines, having nominal power of 110 kW at 1500 min⁻¹, specific effective fuel consumption of 224 g/(kWh) and oil burn of 0.32% of the fuel consumption intended for diesel generator units, were tested. During steady-state tests, diesel exhaust gases were collected to analyze their composition and determine the dispersion of solid particles (SP) with an increase in fuel injection pressure by tightening the nozzle springs.

RESULTS: It was revealed that with an increase in the tightening of the nozzle springs and an increase in the injection pressure (P_i), emissions of solid particles with exhaust gases decrease, and the fuel efficiency of diesel increases. As a result of the tests carried out, it was found that with an increase in the springs tightening of the injectors from (P_i increased from 160 to 185 kPa), emissions of nitrogen oxides (NO_x) decreased by 15%, emissions of carbon monoxide (CO) decreased by 15%, emissions of hydrocarbons (C_xH_y) decreased by 54% and emissions of solid particles (SP) decreased by 33%. Improved mixing and better preparation of fuel for combustion explain the change in CO emissions with the P_i increase. The emissions of C_xH_y indicate a significant improvement in the completeness of fuel combustion in the cycle. Emissions of solid particles containing in exhaust gases are reduced due to the intensification of mixing of air and fuel vapor, contributing to a more complete burn-off of soot in a cylinder. The C_xH_y emissions are reduced and meet the EURO-3 and EURO-4 standards. The environmental footprint was as follows: $N_{\text{EF}} = 51.34$ Ct/year at $P_i = 160$ kPa and $N_{\text{EF}} = 43.66$ Ct/year at $P_i = 185$ kPa, which indicates a decrease in the environmental footprint by 1.17 times or by 15%.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the possibility of using fuel injection equipment with increased fuel injection pressure into a cylinder to reduce harmful emissions from diesel exhaust gases down to the required standards.

Keywords: pressure; injection; fuel; exhaust gases; diesel; harmful emissions.

Cite as:

Melbert AA, Nguyen TrH, Mashensky AV. Use of fuel injection equipment with increased injection pressure for reducing environmental footprint. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(5):325–331. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108145>

Received: 24.05.2022

Accepted: 03.06.2022

Published: 15.11.2022

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической безопасности авто-тракторной техники и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду является одной из основных проблем, решаемых в настоящее время мировым сообществом. Это объясняется колоссальным ростом количества мобильной техники, использующей в качестве топливного окислителя кислород воздуха и загрязняющей отработавшими газами окружающую среду. В свою очередь, загрязнение окружающей среды вызывает целый ряд необратимых последствий, в том числе, связанных с потеплением климата, выпадением кислотных осадков, ухудшением климатических условий и т.д.

К настоящему времени многие автомобильные и транспортные дизельные двигатели оснащаются топливными системами с электронным управлением. Это позволяет более точно оптимизировать рабочий процесс на всех характерных режимах эксплуатации и добиться уменьшения вредных выбросов. По мнению многих исследователей, электронное управление в сочетании с высоким давлением впрыска в пределах 135200 МПа, позволяет разрешить противоречие в достижении наиболее высокой экономичности и наиболее низкой токсичности дизелей [1, 2].

Применение аккумуляторных систем «Common-Rail (CR)» увеличивает перспективы управления рабочими процессами дизелей, например, за счет управления давлением и характеристикой впрыска [3, 4].

Наряду с расширением возможностей электронного управления ставится вопрос и о целесообразности увеличения давления впрыска вплоть до 1800 МПа. Вместе с тем в эксплуатации остаются миллионы дизелей с традиционной топливopодающей аппаратурой (ТПА).

Проблемам повышения экологического качества поршневых двигателей посвящены работы Варшавского И.Л., Малого Р.В., Воинова А.Н., Луканина В.Н., Кутенева В.Ф., Кисуленко Б.Г., Звонова В.А., Иващенко Н.А., Смайлиса В.И., Горбунова В.В., Патрахальцева Н.Н., Демочки О.И., Кульчицкого А.Р., Фомина В.Ф., Кузнецова И.В., Новоселова А.Л., Корнилова Г.С., Панчишного В.И., Каменева В.Ф., Сырбаева В.И., Kitamir T., Taylor K.C., Heywood J.B., Dumesic J.A., Lee T., Topsoe N.Y., Koltakis G.C., Chanders K., Pontikakis G.N., Chatterjee D.L. и других российских и зарубежных инженеров исследователей [1–8].

Возможности снижения токсичности отработавших газов дизеля путем увеличения давления впрыска топлива в цилиндре также отмечаются рядом исследователей [1–4, 7].

Проблема снижения вредных выбросов поршневых двигателей внутреннего сгорания с отработавшими газами является актуальной в настоящее время, так как выполнение стандартов ЕВРО 4/5/6 становится все более сложно как для новой автотракторной техники, так и для уже находящейся в эксплуатации.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование направлено на решении важной прикладной задачи – сокращение вредных выбросов в атмосферу и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду путем увеличения давления впрыска топлива в цилиндре.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторами настоящей работы изучены вопросы о возможности снижения токсичности отработавших газов дизеля путем увеличения давления впрыска топлива в цилиндре для различных модификаций дизелей раз-мерности 15/18 по результатам стендовых испытаний.

Для получения сравнительных данных были отобраны результаты испытаний, включающие измерения по ГОСТ 31967-2012, ГОСТ Р 51249-99 и ГОСТ 24028-2013 выбросов вредных веществ с отработавшими газами и их дымности. Дизели были собраны согласно общим техническим условиям по ГОСТ 10150-2014. Методы испытаний соответствуют ГОСТ 10448-2014.

Были испытаны дизели 6Ч15/18 (7Д6-150) с номинальной мощностью 110 кВт при 1500 мин⁻¹, удельным эффективным расходом топлива 224 г/(кВт·ч) и угаром масла 0,32% от расхода топлива, предназначенного для дизель-генераторных установок.

Испытания проводились на топливе по ГОСТ 305-2013 Л-0,2-40, использовалось масло МТ-16П. Испытания проводились в следующих условиях окружающей среды: температура воздуха в боксе $T_0 = 294–296$ К, атмосферное давление $P_0 = 747–752$ мм рт. ст., относительная влажность воздуха составляла $W_0 = 76–80\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При испытаниях на установившихся режимах был проведен отбор отработавших газов дизеля на анализ их состава и определение дисперсности твердых частиц (ТЧ) при увеличении давления впрыска топлива затяжкой пружин форсунок.

На рис. 1 представлены данные о влиянии затяжки пружины форсунки на выбросы ТЧ дизелем 4Ч13/14. С увеличением затяжки пружин P_B снижаются выбросы твердых частиц с отработавшими газами и повышается топливная экономичность дизеля.

В результате испытания обнаружено, что при увеличении затяжки пружин форсунок P_B со 160 до 185 кПа выбросы оксида азота (NO_x) уменьшаются на 15%, оксида углерода (СО) – на 15%, углеводородов (C_xH_y) – на 54%, твердых частиц – на 33%.

В табл. 1 представлены данные о влиянии давления впрыска на уровни вредных выбросов дизеля Д6Н-250 (6ЧН15/18) по основным компонентам отработавших газов.

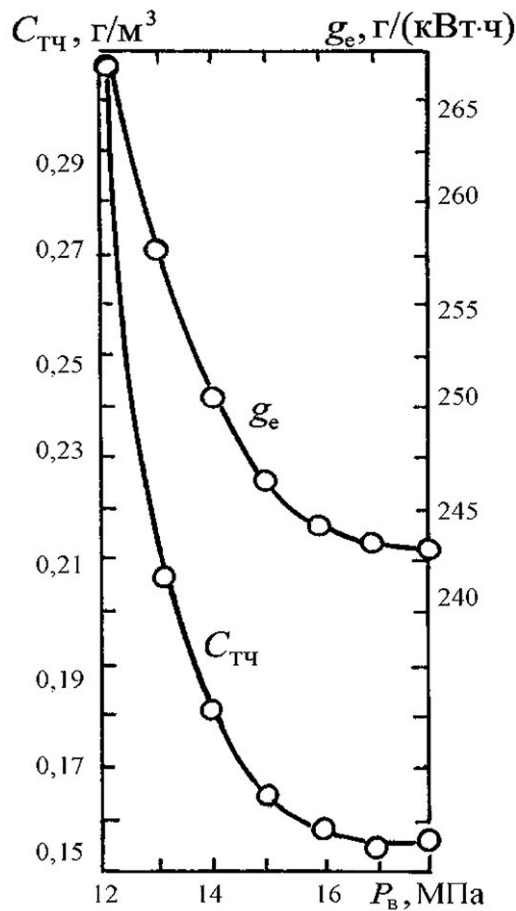


Рис. 1. Влияние затяжки пружины форсунки на выбросы ТЧ дизеля 4СН13/14 при 1750 мин⁻¹, $\overline{N}_e=100\%$.
Fig. 1. Influence of nozzle spring tightening on solid particles emission by the 4Ch13/14 diesel engine for rotation velocity 1750 min⁻¹ and $\overline{N}_e=100\%$.

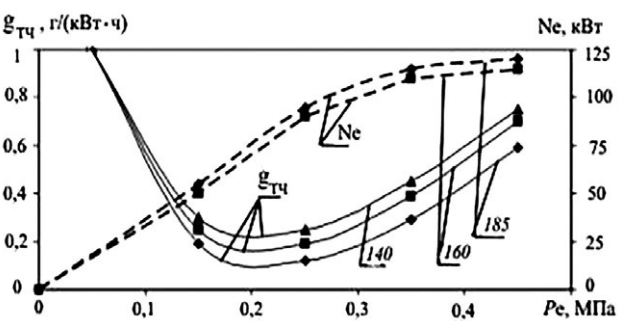


Рис. 2. Влияние давления начала впрыска топлива на уровни выбросов ТЧ дизеля Д6Н-250 (6СН15/18) по нагрузочной характеристике при 1500 мин⁻¹.
Fig. 2. Influence of pressure of fuel injection beginning on levels of solid particles emission of the D6N-250 (6ChN15/18) diesel engine working at the load characteristic for the rotation velocity of 1500 min⁻¹.

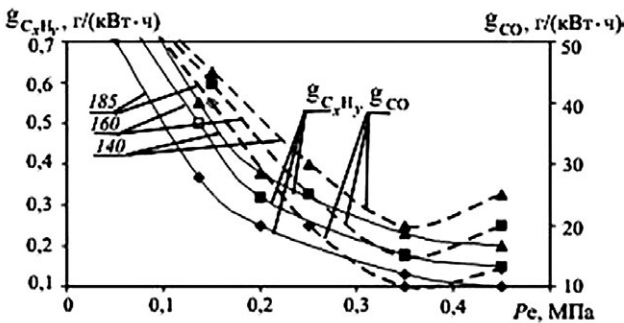


Рис. 3. Влияние давления начала впрыска топлива на уровни выбросов оксида углерода и углеводородов дизеля Д6Н-250 (6СН15/18) по нагрузочной характеристике при 1500 мин⁻¹.
Fig. 3. Influence of pressure of fuel injection beginning on levels of CO and C_xH_y emission of the D6N-250 (6ChN15/18) diesel engine working at the load characteristic for the rotation velocity of 1500 min⁻¹.

Таблица 1. Влияние давления впрыска на уровни вредных выбросов с отработавшими газами дизеля

Table 1. Influence of injection pressure on levels of harmful emissions from diesel exhaust gases

Оценочные показатели	Значения оценочных показателей, г/(кВт·ч)						Степень превышения допустимых выбросов по стандартам ЕВРО-3/4/5/6/РФ для P _в =185 кПа	
	допустимые стандартами					действительные при P _в		
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5	ЕВРО-6	для России (с 2021 г.)	160 кПа	185 кПа	
q _{ОЦ NO}	5,00	3,50	2,00	0,40	6,00	14,51	12,35	2,47/3,53/6,18/30,88/2,05
q _{ОЦ CO}	2,10	1,50	1,50	1,50	3,50	14,31	12,55	5,97/8,36/8,36/8,36/3,59
q _{ОЦ C_xH_y}	0,60	0,46	0,25	0,13	0,40	0,52	0,24	0,4/0,52/0,96/1,85/0,6
q _{ОЦ ТЧ}	0,10	0,02	0,02	0,01	0,10	0,49	0,33	3,3/16,5/16,5/33/3,3

Анализ данных табл. 1 показал, что при изменении давления впрыска со 160 до 185 кПа на исследуемом дизеле можно рассчитывать на то, что выбросы NO_x будут превышать нормы ЕВРО-3 в 2,47 раза, и ЕВРО-4 – в 3,53 раза, ЕВРО-5 в 6,18 раз, ЕВРО-6 в 30,88 раз, России в 2,05 раза. Выбросы C_xH_y снижаются и удовлетворяют нормам как ЕВРО-3, так и ЕВРО-4, ЕВРО-5 и России.

Изменение выбросов СО при увеличении P_b объясняется улучшением смесеобразования и лучшей подготовкой топлива к сгоранию. Выбросы C_xH_y свидетельствуют о значительном улучшении полноты сгорания топлива в цикле работы дизеля.

Выбросы твердых частиц с отработавшими газами снижаются из-за интенсификации смешения воздуха и паров топлива, способствующего более полному выгоранию сажи в цилиндре.

Результаты влияния давления начала впрыска топлива на уровни вредных выбросов твердых частиц, оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в составе отработавших газов дизеля Д6Н-250 (6СН15/18) по нагрузочной характеристике при 1500 мин^{-1} представлены на графиках рис. 2, 3, 4.

Результаты оценки показали, что техногенная нагрузка составила $H_{\text{ТН}}=51,34 \text{ ут/г}$ при $P_b=160 \text{ кПа}$ и $H_{\text{ТН}}=43,66 \text{ ут/г}$ при $P_b=185 \text{ кПа}$, что свидетельствует о снижении техногенной нагрузки в 1,17 раза или на 15%.

Для оценки возможности использования фильтров твердых частиц в системе выпуска изучена дисперсность ТЧ при изменении давления впрыска топлива. Результаты обработки фильтров, полученные с помощью дымомера Bosch, представлены на графиках (рис. 5).

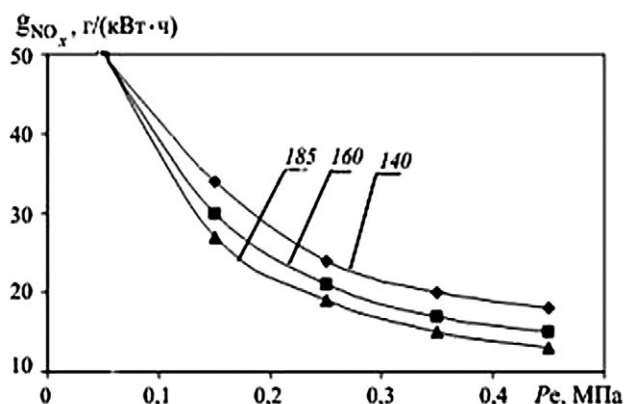


Рис. 4. Влияние давления начала впрыска топлива на уровни выбросов оксидов азота дизеля Д6Н-250 (6СН15/18) по нагрузочной характеристике при 1500 мин^{-1} .

Fig. 4. Influence of pressure of fuel injection beginning on levels of NO_x emission of the Д6Н-250 (6СН15/18) diesel engine working at the load characteristic for the rotation velocity of 1500 мин^{-1} .

Изменение давления впрыска топлива дизеля с 185 до 140 кПа приводит к увеличению среднего диаметра твердых частиц в отработавших газах дизеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Повышение давления впрыска является одним из путей снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.
2. Вопрос о влиянии давления впрыска на уровни вредных выбросов требует тщательного изучения для объяснения воздействия в цикле на формирование концентраций отдельных компонентов отработавших газов.
3. Выполнение требований, предусмотренных стандартами ЕВРО-4/5/6 на последующие годы затруднительно без применения дополнительных комплексных мероприятий.
4. Снижения вредных выбросов с отработавшими газами дизелей до требуемых норм можно достичь, например, одновременным применением топливopодающей аппаратуры с увеличенным давлением впрыска топлива в цилиндр и установкой каталитического нейтрализатора, сажевого фильтра в систему последующей обработки отработавших газов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Мельберт — подготовка к испытаниям, обработка результатов исследования,

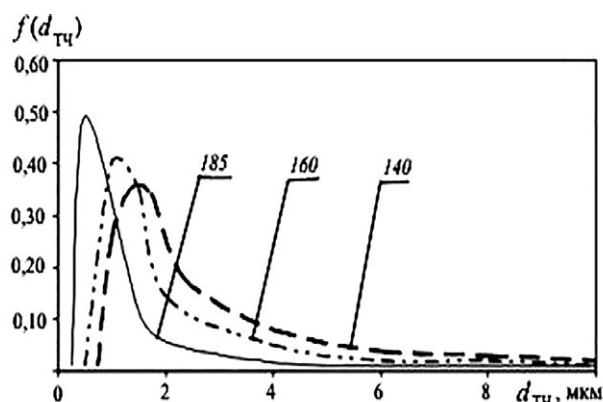


Рис. 5. Дисперсность ТЧ при изменении давления впрыска топлива дизеля Д6Н-250 (6СН15/18).

Fig. 5. Solid particle size depending on fuel injection pressure of the Д6Н-250 (6СН15/18) diesel engine.

написание текста рукописи; Ч.Х. Нгуен — обзор литературы, проведение испытаний, обработка результатов исследования, редактирование текста рукописи; А.В. Машенский — проведение испытаний, обработка результатов, редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов А.Л., Мельберт А.А., Жуйкова А.А. Снижение вредных выбросов дизелей. Новосибирск: Наука, 2007.
2. Новоселов А.Л., Галкин И.А. Топливные системы с повышенным давлением впрыскивания как способ увеличивать экологическую безопасность автотракторной техники // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сборник статей под ред. А.Л. Новоселова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. С. 29–35.
3. Lee T., Reitz R.D. Response surface method optimization of a high-speed direct-injection diesel engine equipped with a common rail injection system // J. Eng. Gas Turbines Power. 2003. Vol. 125, N 2. P. 541–546. doi: doi.org/10.1115/1.1559900
4. Chanders K., Pichon G., Raulf M., et al. Urea SCR heavy duty engine NO_x reduction for EURO-IV // Ingénieurs de l'automobile (Paris). 2004. N 770. P. 61–65.

REFERENCES

1. Novoselov AL, Melbert AA, Zhuikova AA. *Reduction of harmful diesel emissions*. Novosibirsk: Nauka; 2007. (in Russ).
2. Novoselov AL, Galkin IA. Fuel systems with increased injection pressure as a way to increase the environmental safety of automotive equipment. In: Novoselov AL. editor. *Improving the environmental safety of automotive equipment: a collection of articles*. Barnaul: Izd-vo AltGTU; 2004:29–35. (in Russ).
3. Lee T, Reitz RD. Response surface method optimization of a high-speed direct-injection diesel engine equipped with a common rail injection system. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2003;125(2):541–546. doi: 10.1115/1.1559900
4. Chanders K, Pichon G, Raulf M, et al. Urea SCR heavy duty engine NO_x reduction for EURO-IV. *Ingénieurs de l'automobile (Paris)*. 2004;770:61–65.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.A. Melbert — preparation for testing, processing the results of the study, writing the text of the manuscript; Tr.H. Nguyen — literature review, testing, processing of research results, editing the text of the manuscript; A.V. Mashensky — conducting tests, processing the results, editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

5. Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. М.: Транспорт, 1985.
6. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология: учебник для вузов / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2001.
7. Сырбаев В.И. Научно-методические основы обеспечения экологической безопасности автомобильного транспорта: цели, закономерности, теории и методы // Вестник машиностроения. 2004. № 7. С. 75–77.
8. Kitamura T., Ito T., Senda J., et al. Mechanism of smokeless diesel combustion with oxygenated fuels based on the dependence of the equivalence ratio and temperature on soot particle formation // Int. J. Engine Res. 2002. Vol. 3, N 4. P. 223–248. doi: 10.1243/146808702762230923

5. Zhegalin OI, Lupachev PD. *Decrease in toxicity of automobile engines*. Moscow: Transport; 1985. (in Russ).
6. Lukanin VN, Trofimenko YuV. *Industrial and transport ecology: a textbook for universities*. Lukanin VN. editor. Moscow: Vysshaya shkola; 2001. (in Russ).
7. Syrbaev VI. Scientific and methodological foundations for ensuring the environmental safety of road transport: goals, patterns, theories and methods // *Vestnik mashinostroeniya*. 2004;7:75–77. (in Russ).
8. Kitamura T, Ito T, Senda J, et al. Mechanism of smokeless diesel combustion with oxygenated fuels based on the dependence of the equivalence ratio and temperature on soot particle formation. *Int. J. Engine Res*. 2002;3(4):223–248. doi: 10.1243/146808702762230923

ОБ АВТОРАХ

***Мельберт Алла Александровна,**

д.т.н.,
профессор, заведующая кафедрой безопасности
жизнедеятельности;
адрес: Россия, 656000, Барнаул, пр-т Ленина, д. 46;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>;
eLibrary SPIN: 5949-5831;
e-mail: aamelbert@mail.ru

Нгуен Чан Хынг,

аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0276-2303>;
eLibrary SPIN: 5702-0442;
e-mail: hungtnut.nguyen@gmail.com

Машенский Александр Викторович,

инженер, соискатель кафедры безопасности
жизнедеятельности;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-8648>;
eLibrary SPIN: 6339-5630;
e-mail: alek-sandr.mashenskiy@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

***Alla A. Melbert,**

Dr. Sci. (Tech.),
Professor, Head of the Life Safety Department;
address: 46 Lenina avenue, 656000 Barnaul, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-8315>;
eLibrary SPIN: 5949-5831;
e-mail: aamelbert@mail.ru

Tran Hung Nguyen,

post graduate of the Life Safety Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0276-2303>;
eLibrary SPIN: 5702-0442;
e-mail: hungtnut.nguyen@gmail.com

Alexander V. Mashensky,

engineer, graduate of the Life Safety Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-8648>;
eLibrary SPIN: 6339-5630;
e-mail: alek-sandr.mashenskiy@mail.ru

*Corresponding author