



Разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля

М. В. Рыблов*, Д. А. Уханов, А. П. Уханов

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный
университет» (г. Пенза, Россия)

*mr3273pgsha@mail.ru

Введение. Исследования, посвященные интенсификации рабочего процесса транспортных дизелей путем обогащения воздушного заряда определенной дозой (10–20 %) углеводородного активатора (спирт, бензин, керосин, биотопливо и др.), являются актуальной и практически значимой проблемой. Несмотря на эффективность, данный способ не нашел массового применения в технике, т. к. известные механические устройства для обогащения воздушного заряда не обеспечивают точную дозировку и своевременную подачу активатора в дизель в различных режимах его работы. *Материалы и методы.* Решением данной проблемы является разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда, осуществляющей впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля с помощью электромагнитных форсунок, управляемых электронным блоком. Такая система должна обеспечивать работу форсунок по алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля, а также вычислять продолжительность впрыска, соответствующую заданной дозе активатора. Для программирования электронного блока управления теоретически рассчитана продолжительность впрыска определенной дозы активатора и обобщен алгоритм работы электромагнитных форсунок (на примере тракторного дизеля Д-243).

Результаты исследования. Установлено, что при распределенном обогащении воздушного заряда в зависимости от дозы активатора и нагрузочно-скоростного режима работы дизеля массовая цикловая подача активатора может составлять от 1 мг/цикл до 13 мг/цикл, а продолжительность впрыска активатора – от 0,27 мс до 3,5 мс. Для практической реализации способа распределенного обогащения воздушного заряда применительно к дизелю Д-243 трактора МТЗ-82.1 разработана автоматическая система, содержащая бак для активатора, фильтр, электрический насос, рампу, регулятор давления, электромагнитные форсунки, электронный блок управления, датчик расхода топлива, датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала.

Обсуждение и заключение. Разработанная, изготовленная и испытанная система решает проблему практической реализации автоматического обогащения воздушного заряда активатором в такте впуска и способствует улучшению мощностных, топливно-экономических и экологических показателей транспортных дизелей.

Ключевые слова: дизель, воздушный заряд, обогащение воздушного заряда, активатор, система, электромагнитная форсунка, электронный блок управления, датчик

Для цитирования: Рыблов М. В., Уханов Д. А., Уханов А. П. Разработка автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 523–536. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.523-536>

© Рыблов М. В., Уханов Д. А., Уханов А. П., 2018



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Благодарности: Авторы благодарят инженера АО «ПНИЭИ» А. В. Грунюшкина за помощь в изготовлении электронного блока и программировании микроконтроллера; президента НПО «ГАКС-Армсервис», доктора технических наук, профессора С. В. Сейнова за содействие в изготовлении модернизированного впускного трубопровода дизеля. Авторы выражают отдельную благодарность анонимным рецензентам за объективный анализ представленной статьи.

Developing the Automatic System for the Multi-Point Fumigation of Air Charge in the Diesel Engine

M. V. Ryblov*, D. A. Ukhanov, A. P. Ukhanov

Penza State Agrarian University (Penza, Russia)

**mr3273pgsha@mail.ru*

Introduction. The study deals with enhancement of an automotive diesel engine duty cycle through fumigating air charge by the certain dose (10–20 %) of hydrocarbon activator (alcohol, gasoline, kerosene, biodiesel, etc.). This is a relevant problem in engineering. In spite of its effectiveness, this method has not yet been widely applied to machinery. The existing mechanical devices for fumigating air charge do not provide the exact dosage of activator and its timely supply in a diesel engine at different operating modes.

Materials and Methods. The solution for this problem may be the development of an automatic system for the multi-point fumigation of air charge. This device performs the injection of activator into the diesel engine intake manifold branches with the help of electromagnetic injectors managed by the electronic control unit. The system should provide the injectors operation by the algorithm for the cylinders firing order and calculate the injection duration for the adjusted activator dose. For the programming of the Electronic Control Unit, the injection duration of the exact activator dose was theoretically calculated. The algorithm of electromagnetic injectors operation was substantiated (for D-243 tractor diesel engine by the example).

Results. To implement the multi-point fumigation of air charge, it was determined that depending on the activator dose and the engine speed and load mode, the cyclic dose of activator amounts may be from 1 mg per cycle to 13 mg per cycle, while the activator injection duration is from 0.27 ms to 3.5 ms. For the practical realization of the multi-point fumigation of air charge for D-243 diesel engine of MTZ-82.1 tractor the automatic system was designed. The system consists of an activator tank, filter, electric pump, rail, pressure regulator, electromagnetic injectors, electronic control unit, fuel consumption sensor, and sensor of phase and crankshaft speed.

Conclusions. The device solves the problem of the automatic fumigation of air charge at the intake stroke and helps to improve power, fuel economy and environmental indicators of the automotive diesel engines.

Keywords: diesel engine, fumigation of air charge, activator, system, electromagnetic injector, electronic control unit, sensor

For citation: Ryblov M. V., Ukhanov D. A., Ukhanov A. P. Development of Automatic System for Multi-Point Fumigation of Air Charge in Diesel Engine. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):523–536. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.523-536>

Acknowledgements: The authors thank the engineer of PNIEI company A. V. Grunushkin for help in invention of Electronic Control Unit and in programming of microcontroller; the President of GAKS-Armservis Research and Manufacturing Association, D.Sc. (Engineering), professor S. V. Seynov for help in manufacturing of the modified intake manifold for diesel engine. Special thanks to anonymous reviewers for the objective analysis of the article.



Введение

Основные энергетические мощносты в АПК РФ представлены дизелями тракторной, комбайновой и автомобильной техники. Повышение энергоэффективности и экологической безопасности такой техники до сих пор представляет актуальную и практически значимую проблему. В данном направлении значительный научный и практический интерес в России и за рубежом представляют исследования, связанные с обогащением воздушного заряда дизеля углеводородным активатором. Данный способ заключается, как правило, в одноточечной подаче определенной дозы (10–20 %) мелкораспыленного активатора (спирт, бензин, керосин, биотопливо и др.) во впускной трубопровод дизеля в такте впуска свежего заряда. При этом моторное дизельное топливо, подаваемое в цилиндр дизеля в конце такта сжатия штатной системой топливоподачи, впрыскивается не в воздушный поток, а в активаторно-воздушную смесь, образованную во внутренней полости впускного трубопровода и содержащую активные очаги воспламенения, способствующие интенсификации процесса сгорания. В результате за счет повышения полноты сгорания совокупного топлива (моторное топливо + активатор) происходит улучшение индикаторных, эффективных и экологических показателей дизеля [1–4].

Несмотря на известность и эффективность данного способа, одноточечное обогащение не нашло массового применения в автотракторной технике, поскольку известные механические устройства для обогащения воздушного заряда не способны обеспечить точную подачу заданной дозы активатора в различных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля. При этом подача активатора не согласована с тактами впуска свежего воздушного заряда; возникает существенная не-

равномерность распределения активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя.

Для решения указанной проблемы необходимо разработать такую систему обогащения воздушного заряда, которая обеспечивала бы точное автоматическое поддержание заданной дозы активатора во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля, своевременную подачу активатора во время такта впуска свежего заряда в одном из цилиндров и равномерное распределение образованной во впускном трубопроводе активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя.

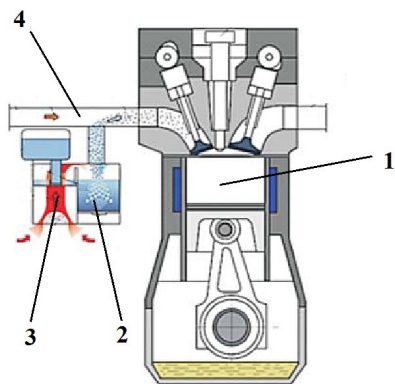
Обзор литературы

В СССР и за рубежом исследования по обогащению воздушного заряда ДВС начали проводиться с 30-х гг. XX в.: вначале для форсирования двигателей танков, самоходных машин и авиационных дизелей, позднее – для улучшения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов транспортных средств. Для подачи активатора во впускной трубопровод ДВС применялись различные механические устройства: карбюратор, дозатор, испаритель или дополнительная форсунка. Обогащение воздушного заряда, например, бензином способствовало повышению мощности дизеля и снижению выбросов оксидов азота, а применение спиртовых активаторов – значительному снижению дымности отработавших газов [4–6].

Несмотря на технический эффект от использования активаторов, механические устройства для обогащения воздушного заряда не получили широкого распространения, т. к. обладали одним общим недостатком, а именно невозможностью автоматического обеспечения заданной дозы активатора в различных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля. Поэтому к концу XX в. интерес к данному на-

учному направлению снизился, а совершенствование конструкции дизелей происходило по другим направлениям: повышение давления впрыска топлива, электронное управление впрыском, рециркуляция отработавших газов, использование каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров и т. п.¹. Однако в настоящее время интерес исследователей к обогащению воздушного заряда различными активаторами возобновляется, поскольку законодательные нормы токсичности отработавших газов ДВС во всем мире продолжают ужесточаться, а существующие методы и средства улучшения экологической чистоты двигателей уже исчерпали свой потенциал²⁻³ [7–8].

Так, одной из последних известных работ по обогащению воздушного заряда являются исследования Технического университета Румынии с подачей в дизель биоэтанола, обработанного ультразвуком. Для подачи данного активатора в одноцилиндровый дизель использовался карбюратор, оснащенный ультразвуковым излучателем (рис. 1). Результаты исследований свидетельствуют о некотором улучшении топливной экономичности дизеля и снижении выбросов оксидов азота. Однако проблема автоматической дозировки активатора в данной работе не была решена, т. к. в условиях стендовых испытаний подача биоэтанола регулировалась вручную путем изменения степени открытия дроссельной заслонки карбюратора [9].



Р и с. 1. Схема установки для обогащения воздушного заряда активатором, обработанным ультразвуком: 1 – дизель; 2 – ультразвуковой излучатель; 3 – карбюратор; 4 – впускной трубопровод

F i g. 1. The scheme of the test bench for fumigating of air charge with the activator modified by ultrasound: 1 – diesel engine; 2 – ultrasonic emitter; 3 – carburetor; 4 – intake manifold

Для обеспечения высокоточной дозировки активатора наиболее целесообразно осуществлять обогащение воздушного заряда с помощью электромагнитной форсунки, управляемой электронным блоком [10]. Такое решение предложено, например, в системе по патенту США № 6679224, содержащей насос для подачи дизельного топлива, насос для подачи активатора, форсунку впрыска топлива в камеру сгорания дизеля и форсунку впрыска активатора во впускной трубопровод. Работой форсунки впрыска активатора на основании сигнала, поступающего с датчика температуры охлаждающей

¹ Грехов Л. В., Габитов И. И., Неговора А. А. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей : учебное пособие. М. : Легион-Автодата, 2013. 292 с.

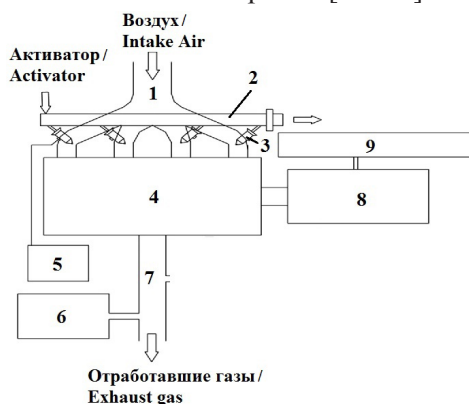
² Thermodynamic modeling of ethanol fumigation in a diesel engine / R. Situ [et al.] // 20th International Congress on Modelling and Simulation. 2013. P. 1568–1574. URL: <https://www.mssanz.org.au/modsim2013/G6/situ.pdf>

³ Janousek G. S. Evaluation of ethanol and water introduction via fumigation on efficiency and emissions of a compression ignition engine using an atomization technique : thesis. Lincoln : University of Nebraska, 2010. 112 p. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.ru/&httpsredir=1&article=1008&context=biosysengdiss>



жидкости и датчика состава рабочей смеси, управляет электронный блок. Система дополнительно оснащена устройством для приготовления активатора на борту транспортного средства путем разделения дизельного топлива на тяжелую («топливную») и легкую («активаторную») фракции [11].

В США, Европе и Китае активно ведутся научно-исследовательские работы по обогащению воздушного заряда дизелей, штатно оснащенных системами электронного впрыска топлива Common-Rail. В качестве активаторов в основном используются спирты (этанол и метанол), а приоритетной задачей является улучшение экологических показателей ДВС. Последней тенденцией является использование систем распределенного впрыска активатора в ветви впускного трубопровода электромагнитными форсунками, количество которых равно количеству цилиндров дизеля. Один из вариантов такой системы показан на рис. 2 [12–14].



Р и с. 2. Схема установки для распределенного обогащения воздушного заряда: 1 – впускной трубопровод; 2 – рампа; 3 – электромагнитные форсунки; 4 – дизель; 5 – электронный блок управления; 6 – газоанализатор; 7 – выпускной трубопровод; 8 – динамометрический стенд; 9 – пульт управления двигателем

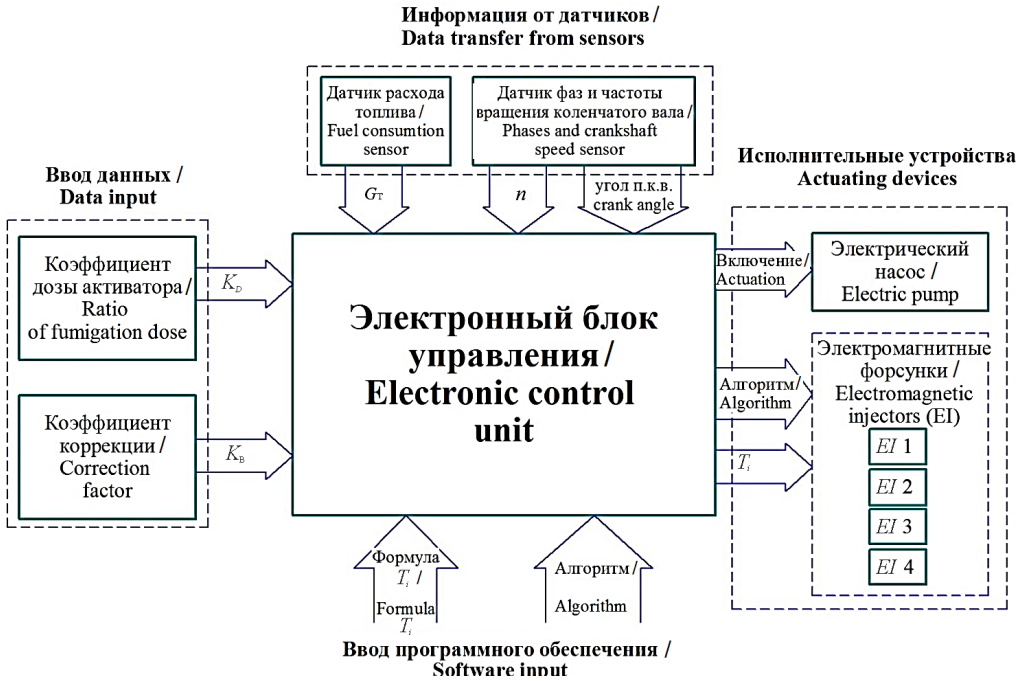
Fig. 2. The scheme of the test bench for the multi-point fumigation of air charge: 1 – intake manifold; 2 – rail; 3 – electromagnetic injectors; 4 – diesel engine; 5 – electronic control unit; 6 – gas analyzer; 7 – exhaust manifold; 8 – dynamometer brake; 9 – engine control board

Таким образом, для точного поддержания заданной дозы активатора на различных режимах работы дизеля, ее своевременной подачи в такте впуска и равномерного распределения активаторно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя необходимо разработать автоматическую систему распределенного обогащения воздушного заряда, осуществляющую впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля электромагнитными форсунками, управляемыми электронным блоком по информативным сигналам с соответствующих датчиков.

Материалы и методы

Принцип построения такой автоматической системы показан на рис. 3. Основу системы составляет электронный блок управления (ЭБУ), который должен обеспечивать функционирование исполнительных устройств: включение электрического насоса и работу электромагнитных форсунок по определенному алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля. Основным выходным параметром ЭБУ является длительность управляющего импульса T_i (продолжительность впрыска активатора электромагнитной форсункой), соответствующая требуемой цикловой подаче активатора. Поэтому ЭБУ должен быть изготовлен на основе микроконтроллера, в программное обеспечение которого закладывается формула для расчета длительности T_i и алгоритм работы электромагнитных форсунок, осуществляющих распределенный впрыск активатора в соответствующие ветви впускного трубопровода дизеля.

ЭБУ должен обладать простотой настройки системы на требуемую дозу активатора (10 или 20 % от массового расхода моторного топлива) и возможностью коррекции цикловой подачи активатора (ЦПА), учитывающей изменение пропускной способности электромагнитной форсунки при использовании активаторов с различ-



Р и с. 3. Функциональная схема автоматической системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля: K_D – коэффициент дозы активатора; K_B – коэффициент коррекции; G_T – массовый расход моторного топлива; n – частота вращения коленчатого вала; п.к.в. – поворот коленчатого вала; T_i – продолжительность впрыска активатора; EI 1 – EI 4 – электромагнитные форсунки

F i g. 3. The functional scheme of the automatic system for the multi-point fumigation of air charge in the diesel engine: K_D – ratio of fumigation dose; K_B – correction factor; G_T – mass fuel consumption; n – crankshaft speed; T_i – injector pulse width; EI 1 – EI 4 – electromagnetic injectors

ными физико-химическими свойствами. Таким образом, в конструкции ЭБУ должны быть предусмотрены задающие клавиши для ввода коэффициента дозы активатора K_D и коэффициента коррекции цикловой подачи активатора K_B .

Для вычисления микроконтроллером ЭБУ требуемой цикловой подачи активатора в зависимости от нагрузочного и скоростного режима работы дизеля необходима информация о текущих параметрах работы двигателя: массовом расходе моторного топлива (G_T) и частоте вращения коленчатого вала (n), а для обеспечения фазированного впрыска активатора в такте впуска и работы форсунок по заданному алгоритму – информация об угле поворота коленчатого вала. Поэтому для работы ЭБУ необходимы

соответствующие датчики, информативные сигналы с которых содержат сведения об указанных параметрах.

Таким образом, величина требуемой цикловой подачи активатора ($g_{\text{ца}}$, г/цикл), подаваемого в такте впуска для обогащения воздушного заряда дизеля, зависит от параметров, характеризующих нагрузочный и скоростной режимы работы дизеля:

$$g_{\text{ца}} = f(G_T, n), \quad (1)$$

где G_T – массовый расход моторного топлива, кг/ч; n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹.

Цикловая подача активатора связана с массовым расходом топлива через соотношение



$$g_{\text{ца}} = K_D \cdot g_{\text{шт}} = K_D \cdot \frac{G_T \cdot \tau}{0,12 \cdot n \cdot z}, \quad (2)$$

где K_D – коэффициент дозы активатора (при дозе активатора 10 % коэффициент $K_D = 0,1$; при дозе 20 % $K_D = 0,2$); $g_{\text{шт}}$ – цикловая подача моторного топлива, г/цикл; $\tau = 4$ – тактность дизеля; z – число цилиндров дизеля.

Цикловая подача активатора прямо пропорциональна длительности управляющего импульса T_i (мс), подаваемого на электромагнитную форсунку, поэтому данные величины связаны соотношением [15]:

$$T_i = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot K_B \cdot g_{\text{ца}}}{C_{\text{п}}} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot K_B \cdot K_D \cdot G_T}{C_{\text{п}} \cdot n \cdot z}, \quad (3)$$

где K_B – коэффициент коррекции ЦПА; $C_{\text{п}}$ – статическая производительность электромагнитной форсунки, г/мин.

Массовый расход топлива в единицу времени G_T определяется с помощью расходомера топлива, который используется в качестве датчика нагрузочного режима и вырабатывает информативные импульсные сигналы определенной частоты $N_{\text{имп}}$ на 1 л моторного топлива. При этом число импульсов, вырабатываемых расходомером в секунду (частота f , Гц), прямо пропорционально расходу G_T :

$$f = \frac{G_T \cdot N_{\text{имп}}}{3600 \rho_{\text{дт}}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{дт}}$ – плотность дизельного топлива, г/см³.

Выразив из формулы (4) расход G_T и подставив его в формулу (3), получим формулу для программирования микроконтроллера ЭБУ по длительности управляющего импульса T_i :

$$T_i = \frac{7,2 \cdot 10^9 \cdot K_B \cdot K_D \cdot \rho_{\text{дт}} \cdot f}{C_{\text{п}} \cdot n \cdot z \cdot N_{\text{имп}}}. \quad (5)$$

Величины z , $\rho_{\text{дт}}$, $N_{\text{имп}}$ и $C_{\text{п}}$ зависят от конструкции дизеля, марки моторно-

го топлива, характеристик расходомера топлива, пропускной способности электромагнитной форсунки и вида активатора, используемого для обогащения воздушного заряда. Если данные величины известны и их считать константами, то в программное обеспечение микроконтроллера ЭБУ вводится формула, представляющая собой функцию четырех переменных:

$$T_i = f(K_B, K_D, f, n). \quad (6)$$

При этом программа микроконтроллера ЭБУ должна не только вычислять значение длительности импульсов T_i , но и обеспечивать их своевременную подачу в обмотки электромагнитных форсунок в определенной последовательности (по алгоритму). Данный алгоритм зависит от порядка работы цилиндров дизеля, а также количества и расположения цилиндров (или ветвей впускного трубопровода).

Рассмотрим такой алгоритм на примере тракторного дизеля Минского моторного завода Д-243 (4Ч11/12,5).

Конструктивной особенностью данного дизеля является невозможность установки индивидуальных электромагнитных форсунок для каждого цилиндра, т. к. на четыре цилиндра приходится только две ветви впускного трубопровода. Поэтому распределенное обогащение воздушного заряда на данной модели дизеля было реализовано с помощью двух электромагнитных форсунок, первая из которых осуществляет обогащение воздушного заряда, поступающего в первый и второй цилиндры, вторая – заряда, поступающего в третий и четвертый цилиндры. В соответствии с порядком работы цилиндров дизеля 1-3-4-2 порядок работы электромагнитных форсунок будет 1-2-2-1. Если за начальный сигнал датчика фаз принять момент начала такта впуска во втором цилиндре, то порядок работы электромагнитных форсунок примет вид 1-1-2-2. Таким образом, форсун-

ки осуществляют попарный последовательный впрыск активатора в ветви впускного трубопровода в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 4 [15].

Результаты исследования

Для вывода окончательной формулы по расчету продолжительности T_i , подставим в выражение (5) известные значения, которые будут являться константами: число цилиндров дизеля Д-243 $z = 4$, плотность моторного топлива $\rho_{дт} = 0,82 \text{ г/см}^3$, частота импульсов расходомера топлива $N_{имп} = 800 \text{ импульсов/л}$, статическая производительность электромагнитной форсунки $C_n = 200 \text{ г/мин}$.

Сгруппировав и перемножив все константы, получим формулу, которая вводится в программное обеспечение микроконтроллера ЭБУ:

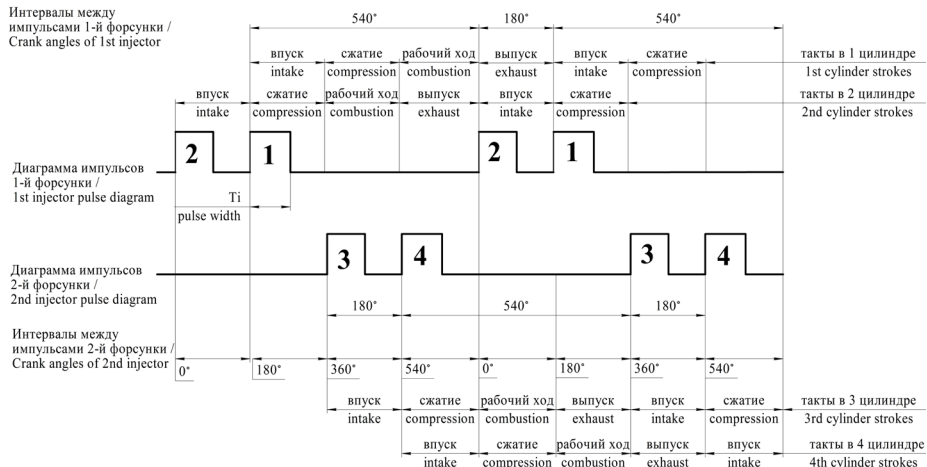
$$T_i = \frac{7,2 \cdot 10^9 \cdot 0,82 \cdot K_B \cdot K_D \cdot f}{200 \cdot 4 \cdot 800 \cdot n} = 9225 \cdot \frac{K_B \cdot K_D \cdot f}{n}, \text{ мс.} \quad (7)$$

Результаты расчетов по формулам (2) и (7) показывают, что величина ци-

кловой подачи активатора может варьироваться от 1 мг/цикл (при 10%-ной дозе активатора и работе дизеля в режиме холостого хода) до 13 мг/цикл (при 20%-ной дозе активатора и работе дизеля в номинальном режиме). При этом длительность импульса T_i , подаваемого в обмотку электромагнитной форсунки, составляет от 0,27 мс до 3,5 мс.

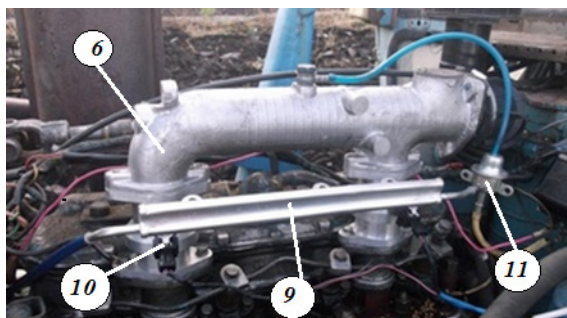
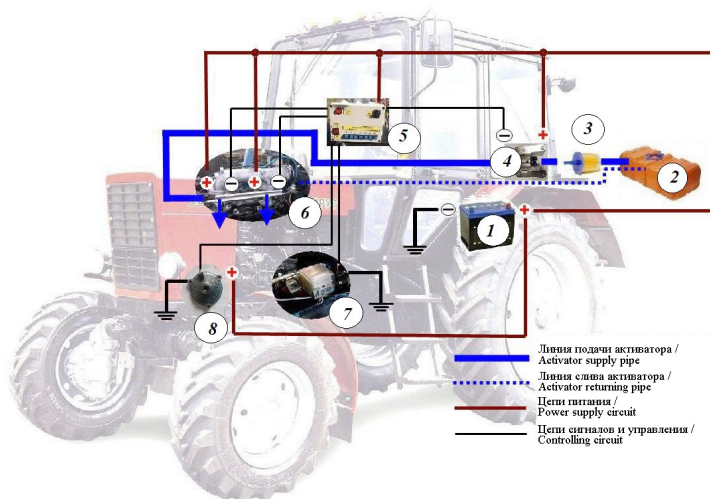
На основании полученных результатов теоретических исследований была разработана и запатентована автоматическая система распределенного обогащения воздушного заряда активатором применительно к дизелю Д-243 трактора МТЗ-82.1 [16–18].

Система (рис. 5) содержит бак 2 для активатора, фильтр 3, электрический насос 4, ЭБУ 5, модернизированный впускной трубопровод 6, датчик расхода топлива (расходомер) 7, датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала 8. Модернизированный трубопровод 6 установлен взамен штатного впускного трубопровода и оснащен рампой 9, электромагнитными форсунками 10 и регулятором давления 11. Электрические цепи питания ЭБУ 5, насоса 4, датчиков 7 и 8, форсунок 10 подклю-



Р и с. 4. Диаграмма управляющих импульсов при распределенном обогащении воздушного заряда четырехцилиндрового дизеля двумя электромагнитными форсунками (1, 2, 3, 4 – номера цилиндров, в которых происходит такт впуска)

F i g. 4. The control pulse diagram for multi-point fumigation of air charge on four-cylinder diesel engine with two electromagetic injectors (1, 2, 3, 4 are the numbers of cylinders at the intake stroke)



Р и с. 5. Система распределенного обогащения воздушного заряда дизеля Д-243 трактора МТЗ-82.1:
 1 – источник тока; 2 – бак для активатора; 3 – фильтр; 4 – электрический насос; 5 – ЭБУ;
 6 – модернизированный впускной трубопровод; 7 – датчик расхода топлива; 8 – датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала; 9 – рампa;
 10 – электромагнитные форсунки; 11 – регулятор давления

Fig. 5. The system for multi-point fumigation of air charge on D-243 diesel engine of MTZ-82.1 tractor:
 1 – power source; 2 – activator tank; 3 – filter; 4 – electric pump; 5 – electronic control unit;
 6 – modified intake manifold; 7 – fuel consumption sensor; 8 – sensor of phase and crankshaft speed;
 9 – rail; 10 – electromagnetic injectors; 11 – pressure regulator

ны к источнику тока 1 бортовой сети трактора.

ЭБУ 5 оснащен клавишей «Пуск/Сброс» и задающими клавишами для ввода коэффициентов дозы (K_D) и коррекции цикловой подачи (K_B) активатора. Основным элементом электрической схемы ЭБУ является микроконтроллер⁴ [19], в программу которого заложены

алгоритм работы электромагнитных форсунок и формула (7) для вычисления длительности управляющего импульса T_i . К ЭБУ подключены датчики 7 и 8, электрический насос 4 и электромагнитные форсунки 10.

Датчик-расходомер 7 предназначен для согласования заданной дозы активатора (10 или 20 %) и массового рас-

⁴ Рыблов М. В., Матвеев В. А., Новичков А. В. Электронный блок управления системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы : мат-лы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : РИО ПГАУ, 2017. С. 160–162. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_32288768_26089150.pdf

хода моторного топлива, информация о котором поступает в микроконтроллер ЭБУ в виде импульсного сигнала определенной частоты (параметр f). Датчик-расходомер роторно-поршневого типа установлен в линии низкого давления штатной системы топливоподдачи дизеля между фильтром грубой очистки и топливоподкачивающим насосом.

В узле привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) смонтирован датчик фаз и частоты вращения коленчатого вала δ . Работа датчика основана на эффекте Холла. Момент начала такта впуска в цилиндрах дизеля определяется по углу поворота кулачкового вала ТНВД, что служит опорным сигналом для срабатывания электромагнитных форсунок. Кроме того, с датчика δ в блок ЭБУ поступает информация о скоростном режиме дизеля (параметр n), т. к. частота вращения коленчатого вала прямо пропорциональна частоте вращения кулачкового вала ТНВД.

Система работает следующим образом. В ЭБУ 5 подается напряжение питания от источника тока 1 . После пуска и прогрева дизеля оператор клавишами на панели ЭБУ задает коэффициенты K_D и K_B . После нажатия клавиши «Пуск/Сброс» происходит включение электрического насоса 4 , который подает активатор в рампу 9 и далее – к электромагнитным форсункам 10 .

Микроконтроллер ЭБУ обрабатывает информативные сигналы (параметры f и n), поступающие с датчиков 7 и 8 . Кроме того, микроконтроллер обрабатывает введенные оператором значения коэффициентов K_D и K_B . На основании полученных параметров микроконтроллер по формуле (7) вычисляет значение длительности импульса T_i , подаваемого на электромагнитную форсунку, и определяет момент начала впрыска активатора форсунками (такты впуска). Управляющие импульсы, вырабатываемые микроконтроллером, подаются в электрические цепи элект-

ромагнитных форсунок, осуществляющих впрыск активатора в ветви впускного трубопровода дизеля по алгоритму, соответствующему порядку работы цилиндров дизеля.

При изменении нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля изменяются и информативные сигналы, поступающие с датчиков 7 и 8 . В результате изменения параметров f и n микроконтроллер вычисляет новое значение продолжительности импульса T_i , подаваемого в обмотки электромагнитных форсунок. При этом изменится цикловая подача активатора в соответствии с предварительно заданными коэффициентами K_D и K_B .

Если при работе дизеля на малых нагрузках пропускная способность электромагнитных форсунок 10 снизится и станет меньше производительности электрического насоса 4 , давление активатора в рампе повысится, сработает регулятор давления 11 , и произойдет перепуск избыточного количества активатора обратно в бак, в результате чего давление активатора в рампе стабилизируется.

Для прекращения подачи активатора в дизель оператор нажимает клавишу «Пуск/Сброс». При этом происходит размыкание цепей питания электрического насоса 4 и электромагнитных форсунок 10 , после чего можно задать новые значения коэффициентов K_D и K_B .

Обсуждение и заключение

Представленная методика расчета параметров управляющих импульсов и алгоритм работы электромагнитных форсунок применимы для различных моделей дизелей при оснащении их автоматической системой распределенного обогащения воздушного заряда активатором. ЭБУ является универсальным для различных типов дизелей, при этом в зависимости от числа, расположения и порядка работы цилиндров изменяется только



программное обеспечение микроконтроллера.

Разработанная автоматическая система распределенного обогащения воздушного заряда обеспечивает точное поддержание заданной дозы активатора во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля, подачу активатора, согласованную с тактами выпуска свежего воздушного заряда в цилиндры дизеля,

и равномерное распределение активаторно-воздушной смеси по цилиндрам.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о практической реализации способа распределенного обогащения воздушного заряда на автотракторной технике, что способствует улучшению мощностных, топливно-экономических и экологических показателей дизелей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Review on alcohol fumigation on diesel engine : A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission / A. Imran [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 26. P. 739–751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.070>
2. **Уханов А. П., Рыблов М. В., Уханов Д. А.** Обогащение воздушного заряда тракторных дизелей углеводородными активаторами : монография. Пенза : РИО ПГСХА, 2015. 199 с. URL: <https://rucont.ru/file.ashx?guid=9400d884-8f32-40f6-9b4e-8d6ba35b07d0>
3. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Повышение производительности пахотного агрегата обогащением воздушного заряда тракторного дизеля на режиме перегрузок // Нива Поволжья. 2013. № 2. С. 93–99. https://elibrary.ru/download/elibrary_20226859_84793221.pdf
4. Effect of gasoline fumigation on diesel engine performance and emissions / L. J. Ou [et al.] // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 130-134. P. 1744–1748. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1744>
5. **Yao C., Pan W., Yao A.** Methanol fumigation in compression-ignition engines : A critical review of recent academic and technological developments // Fuel. 2017. Vol. 209. P. 713–732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.038>
6. **Qudais M., Haddad O., Qudaisat M.** The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions // Energy Conversion and Management. 2000. Vol. 41, Issue 4. P. 389–399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00099-0)
7. Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity Diesel engine / B. S. Chauhan [et al.] // Energy. 2011. Vol. 36, Issue 2. P. 1030–1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.005>
8. Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine // A. F. Lopez [et al.] // Fuel. 2015. Vol. 153. P. 483–491 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.022>
9. Effects of bioethanol ultrasonic generated aerosols application on diesel engine performances / F. Mariasiu [et al.] // Thermal science. 2015. Vol. 19, no. 5. P. 1931–1941. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI140703108M>
10. **Hansdah D., Murugan S.** Bioethanol fumigation in a DI diesel engine // Fuel. 2014. Vol. 130. P. 324–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.047>
11. Patent 6679224 US, Int. CI F02B7/06. Method and apparatus for operating a diesel engine under stoichiometric and slightly fuel-rich conditions / R. H. Stanglmaier; Southwest Research Institute; № 09/992373; Filed Nov., 6, 2001; Publ. Jan. 20, 2004. URL: <http://www.freepatentsonline.com/6679224.pdf>
12. Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine / Wang Q. [et al.] // Fuel. 2016. Vol. 164. P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.003>
13. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol / C. H. Cheng [et al.] // Fuel. 2008. Vol. 87, Issues 10-11. P. 1870–1879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.002>

14. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine / Wang Q. [et al.] // Fuel. 2015. Vol. 140. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.067>

15. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Теоретическое обоснование работы системы двухточечного обогащения воздушного заряда дизеля // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2 (38). С. 185–191. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-2-185-191>

16. Патент 2330173 РФ, МПК F02M 25/00; F02D 19/00. Устройство для обогащения воздушного заряда / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, В. А. Рачкин, М. В. Рыблов; Пенз. гос. с-х. академия. № 2006127884/06; Заявл. 31.07.2006; Оpubл. 27.07.2008; Бюл. № 21. URL: <http://allpatents.ru/patent/2330173.html>

17. Патент на полезную модель 157301 РФ МПК F02D 19/12, F02M 43/00. Система впрыска активатора во впускной трубопровод дизеля / М. В. Рыблов, А. П. Уханов, Д. А. Уханов, С. А. Симаков; Пенз. гос. с-х. академия. № 2015102646; Заяв. 27.01.2015; Оpubл. 27.11.2015; Бюл. № 33.

18. Патент на полезную модель 177583 РФ МПК F02M 43/00, F02D19/08; F02B 48/00. Устройство для дозированной подачи активатора в дизель / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, М. В. Рыблов, С. А. Симаков. № 2017122353; Заяв. 26.04.2016; Оpubл. 01.03.2018; Бюл. № 7.

19. **Рыблов М. В., Уханов А. П., Уханов Д. А.** Электронная система распределенного обогащения воздушного заряда тракторного дизеля // Нива Поволжья. 2018. № 1 (46). С. 114–120. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnaya-sistema-raspredelennogo-obogascheniya-vozdushnogo-zaryada-traktornogo-dizelya>

Поступила 18.06.2018; принята к публикации 27.07.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторах:

Рыблов Михаил Владимирович, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), кандидат технических наук, ResearcherID: M-2237-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9750-9887>, mr3273pgsha@mail.ru

Уханов Денис Александрович, профессор кафедры «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), доктор технических наук, ResearcherID: M-2694-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9507-893X>, уханов_денис_a@mail.ru

Уханов Александр Петрович, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30), доктор технических наук, ResearcherID: M-2681-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3433-0281>, dispgau@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Рыблов – литературный и патентный анализ, проведение теоретических исследований, изготовление опытного образца системы распределенного обогащения воздушного заряда дизеля, подготовка начального варианта текста, перевод аннотации и подписей к рисункам на английский язык; Д. А. Уханов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и выводов, верстка и редактирование текста; А. П. Уханов – общая научная концепция, консультирование по технической части, проведение критического анализа исследования и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Imran A., Varman M., Masjuki H. H., Kalam M. A. Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 26:739–751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.070>
2. Ukhanov A. P., Ryblov M. V., Ukhanov D. A. *The enrichment of tractor diesel engine air charge with hydrocarbon activators: A monograph*. Penza: Penza State Agricultural Academy Publ.; 2015. 199 p. Available at: <https://rucont.ru/file.ashx?guid=9400d884-8f32-40f6-9b4e-8d6ba35b07d0> (In Russ.)
3. Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A. Raising productivity of ploughing unit by means of enriching the air charge of tractor diesel in the mode of operation overloads. *Niva Povolzhya = Volga Region Cornfield*. 2013; 2:93–99. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_20226859_84793221.pdf (In Russ.)
4. Ou L., Wang C., Qian Y., Huang W., Zhu S. W., Sun J. Effect of gasoline fumigation on diesel engine performance and emissions. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 130-134:1744–1748. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1744>
5. Yao C., Pan W., Yao A. Methanol fumigation in compression-ignition engines: A critical review of recent academic and technological developments. *Fuel*. 2017; 209:713–732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.038>
6. Qudais M., Haddad O., Qudaisat M. The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*. 2000; 41(4):389–399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00099-0)
7. Chauhan B. S., Kumar N., Pal S. S., Jun Y. D. Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity diesel engine. *Energy*. 2011; 36(2):1030–1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.005>
8. Lopez A. F., Cadrazco M., Agudelo A. F., Corredor L. A., Vélez J. A., Agudelo J.R. Impact of n-butanol and hydrous ethanol fumigation on the performance and pollutant emissions of an automotive diesel engine. *Fuel*. 2015; 153:483–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.022>
9. Mariasiu F., Burnete N. V., Moldovanu D. Effects of bioethanol ultrasonic generated aerosols application on diesel engine performances. *Thermal Science*. 2015; 19(5):1931–1941. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI140703108M>
10. Hansdah D., Murugan S. Bioethanol fumigation in a DI diesel engine. *Fuel*. 2014; 130:324–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.047>
11. Patent 6679224 US, Int.Cl F02B7/06. Method and apparatus for operating a diesel engine under stoichiometric and slightly fuel-rich conditions / Stanglmaier R. H.; Southwest Research Institute; No. 09/992373; Filed 11/6/2001; Publ. 01/20/2004. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/6679224.pdf>
12. Wang Q., Wang B., Yao C., Wu T., Wei H., Dou Z. Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine. *Fuel*. 2016; 164:99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.003>
13. Cheng C. H., Cheung C. S., Chan T. L. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol. *Fuel*. 2008; 87(10-11):1870–1879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.002>
14. Wang Q., Wei L., Pan W., Yao C. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine. *Fuel*. 2015; 140:164–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.067>
15. Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A. Theoretical operation justification of the system of two-point enrichment of the diesel air charge. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = Ulyanovsk State Agricultural Academy Bulletin*. 2017; 2(38):185–191. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-2-185-191> (In Russ.)
16. Patent 2330173 of the Russian Federation, IPC F02M 25/00; F02D 19/00. A device for enriching the air charge / Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Rachkin V. A., Ryblov M. V.; Penza State Agricultural

Academy. No. 2006127884/06; Appl. 07/31/2006; Publ. 07/27/2008; Bulletin No. 21. Available at: <http://allpatents.ru/patent/2330173.html> (In Russ.)

17. Patent for useful model 157301 of the Russian Federation IPC F02D 19/12, F02M 43/00. Activator injection system in diesel intake pipe / Ryblov M. V., Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Simakov S. A.; Penza State Agricultural Academy. No. 2015102646; Appl. 01/27/2015; Publ. 11/27/2015; Bulletin No. 33 (In Russ.)

18. Patent for useful model 177583 of the Russian Federation IPC F02M 43/00, F02D19 / 08; F02B 48/00. A device for dosed supply of activator to diesel / Ukhanov A. P., Ukhanov D. A., Ryblov M. V., Simakov S. A.. № 2017122353; Claim 04/26/2016; Publ. 03/01/2018; Bulletin No. 7. (In Russ.)

19. Ryblov M. V., Ukhanov D. A., Ukhanov A. P. The electronic system of the distributed enrichment of air charge in tractor diesel. *Niva Povolzhya = Volga Region Cornfield*. 2018; 1(46):114–120. https://elibrary.ru/download/elibrary_32652156_62878243.pdf (In Russ.)

Received 18.06.2018; revised 27.07.2018; published online 28.12.2018

About authors:

Mikhail V. Ryblov, Associate Professor, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: M-2237-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9750-9887>, mr3273pgsha@mail.ru

Denis A. Ukhanov, Professor, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: M-2694-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9507-893X>, uxanov_denis_a@mail.ru

Alexander P. Ukhanov, Head, Chair of Tractors, Automobiles and Thermal Energetics, Penza State Agrarian University (30 Botanicheskaya St., Penza 440014, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: M-2681-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3433-0281>, dispgau@mail.ru

Authors' contribution:

M. V. Ryblov – literary and patent analysis, performing of theoretical study, manufacturing of experimental sample of the system for multi-point fumigation of air charge in diesel engine, writing the draft, translation of the annotation and figures into English; D. A. Ukhanov – scientific management, formulating the basic research concept, drawing the conclusions, word processing and editing the text; A. P. Ukhanov – primary scientific concept, consulting in technical branch of the study, critical analysis of research and finalizing the text.

All authors have read and approved the final version of the paper.