



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2014.6.9>

УДК 621.436

ББК 39.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Иващенко Николай Антонович

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Э-2,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
ivaschen@mail.ru
2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

Кузнецов Александр Гаврилович

Доктор технических наук,
профессор кафедры Э-6,
МГТУ им. Н. Э. Баумана,
kuzag441@mail.ru
2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

Ворнычев Дмитрий Сергеевич

Аспирант кафедры Э-6,
МГТУ им. Н. Э. Баумана
kuzag441@mail.ru
2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

Фурман Виктор Владимирович

Кандидат технических наук,
генеральный директор – главный конструктор,
ООО «ППП Дизельавтоматика»
kuzag441@mail.ru
ул. им. Н. Г. Чернышевского, 109, 410017 г. Саратов, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является экспериментальное и расчетное исследование характеристик токсичности отработавших газов дизеля с турбонаддувом. В результате экспериментального исследования, которое проводилось с имитацией работы одноцилиндрового отсека дизеля на неустановившихся режимах, получены значения параметров рабочего процесса дизеля, в том числе – концентраций оксидов углерода и азота.

По результатам экспериментального исследования сформированы функциональные зависимости для концентраций токсичных компонентов отработавших газов: оксидов азота и оксида углерода – от коэффициента избытка воздуха и температуры отработавших газов.

С использованием разработанной математической динамической модели комбинированного двигателя проведено моделирование переходных процессов дизеля в составе энергетической установки тепловоза при изменении управляющего (позиция контроллера машиниста) и возмущающего (момент сопротивления движению) воздействий с анализом характеристик показателей токсичности отработавших газов.

Ключевые слова: дизель, токсичность отработавших газов, концентрация токсичных компонентов, энергетическая установка тепловоза, математическая модель.

В настоящее время создание тепловых двигателей и их систем управления ведется с учетом экологических показателей, прежде всего – токсичности отработавших газов. При проектировании двигателей широко используются программные комплексы, такие как [4–9]. Эти программные комплексы дают возможность рассчитать рабочий процесс двигателя на установившихся режимах. При этом определение показателей токсичности отработавших газов представляет сложную задачу. Статистика распределения режимов работы показывает, что двигатели транспортных установок значительную часть времени работают на неуставившихся режимах. Здесь расчет показателей токсичности еще менее проработан.

В данной работе рассматривается задача исследования характеристик токсичности отработавших газов дизеля с турбонаддувом на неуставившихся режимах экспериментальными и расчетными методами.

Получение экспериментальных характеристик дизеля с турбонаддувом на неуставившихся режимах осложняется тем, что на таких режимах в комбинированном двигателе нарушаются балансы механических энергий и потоков массы газов, соответствующие установившимся режимам. Нарушение статических балансов энергий и масс вещества происходит из-за инерционности элементов комбинированного двигателя, в основном – поршневой части и турбокомпрессора. Сочетания параметров рабочего процесса двигателя на неуставившихся режимах не соответствуют тем, которые имеют место на режимах установившихся. Поэтому экспериментальные данные, полученные при снятии скоростных или нагрузочных характеристик при

проведении обычных статических испытаний, недостаточны для анализа неуставившихся режимов работы двигателя.

В данной работе была поставлена задача проведения экспериментального исследования, при котором на режимах статических характеристик осуществляется имитация неуставившихся режимов работы комбинированного двигателя. При проведении таких испытаний необходимо организовать независимое изменение параметров рабочего процесса поршневой части двигателя и агрегатов турбонаддува. Проведение подобных испытаний на полноразмерном двигателе сопряжено со значительными трудностями, поэтому для испытаний целесообразно использовать одноцилиндровый отсек. Турбокомпрессор отключается от двигателя, а снабжение цилиндра воздухом осуществляется от автономного источника, что позволяет разорвать газовую связь поршневой части и турбокомпрессора и задавать сочетания подачи топлива и давления наддува, соответствующие не только установившимся, но и неуставившимся режимам.

В данной работе объектом исследования являлся широко применяемый на различных энергетических установках дизель размерности 26/26 производства ОАО «Коломенский завод». Испытания проводились на одноцилиндровом отсеке дизеля с подводом воздуха от постороннего источника. При частоте вращения вала отсека $n_d = 750 \text{ мин}^{-1}$ (в энергетических установках дизель размерности 26/26 с различным числом цилиндров в основном работает как привод генератора переменного тока на данной частоте вращения) были сняты нагрузочные характеристики при различных постоянных давлениях наддува.

При испытаниях фиксировались основные параметры рабочего процесса дизеля: давление и температура воздуха во впускном трубопроводе; давление и температура отработавших газов в выпускном трубопроводе; расходы воздуха и топлива через двигатель; индикаторная и эффективная мощности; коэффициент избытка воздуха; максимальное давление сгорания; средние индикаторное и эффективное давления; удельные индикаторный и эффективный расходы топлива; индикаторный, механический и эффективный КПД; содержание оксидов азота и оксида углерода в отработавших газах; дымность выхлопа по шкале «HARTRIDG»; и др. Производилось также снятие диаграмм изменения давления газов в цилиндре двигателя.

Были установлены следующие фазы газораспределения. Впуск: начало – 20 град до верхней мертвой точки (ВМТ), конец – 30 град за нижней мертвой точкой (НМТ). Выпуск: начало – 35 град до НМТ, конец – 15 град за ВМТ. Угол опережения подачи топлива составлял 27 град до ВМТ. Ограничительными параметрами в процессе испытаний являлись: температура отработавших газов в выпускном трубопроводе – не более 700 °С, максимальное давление сгорания – не более 14 МПа.

На рисунках 1–3 приведены экспериментальные нагрузочные характеристики с зависимостями от эффективной мощности отсека P_e следующих параметров: коэффициента избытка воздуха α ; температуры отработавших газов T_r , °К; концентраций содержания в отработавших газах оксидов азота C_{NOx} , % и оксида углерода C_{CO} , %.

При анализе полученных при экспериментальном исследовании результатов изменения концентраций токсичных компонентов отработавших газов на различных режимах работы двигателя было принято допущение, что наибольшее влияние на показатели токсичности оказывают коэффициент избытка воздуха и температура отработавших газов.

Физико-химические механизмы образования оксидов азота и углерода различны. Выделение оксидов углерода увеличивается при ухудшении условий сгорания топлива. Это режимы с низкими значениями коэффициента избытка воздуха и температуры отработавших газов. Для образования оксидов азота требуется наличие достаточного количества кислорода (высокие значения коэффициента избытка воздуха) и высокие температуры.

Зависимости показателей токсичности отработавших газов от режимов работы двигателя имеют достаточно сложный характер протекания. Из результатов экспериментов, приведенных на рисунках 1–3, видно, что на большинстве исследованных режимов основное влияние на образование оксидов азота оказывает температура процесса сгорания, которая определяет и температуру отработавших газов. Образование оксидов углерода больше зависит от коэффициента избытка воздуха, особенно – в области его малых значений.

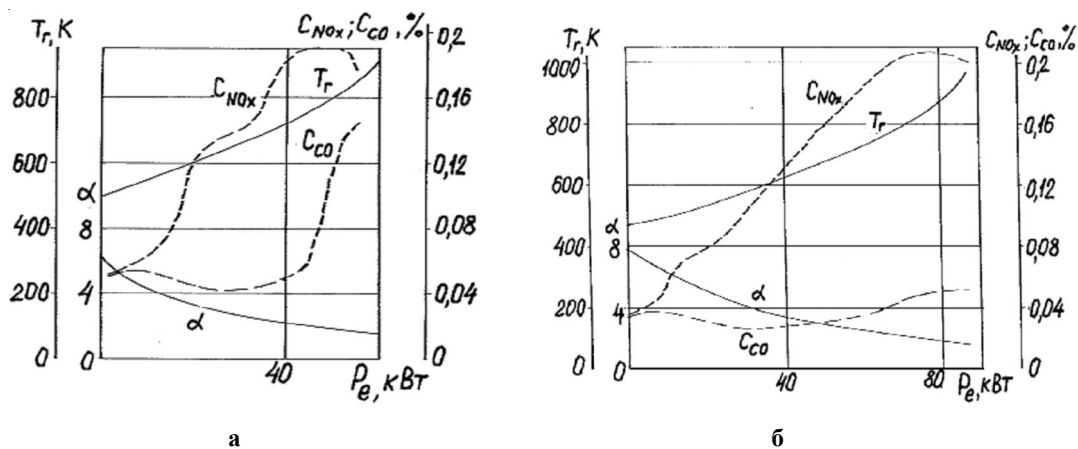


Рис. 1. Нагрузочные характеристики отсека:
а – при $p_k = 0,1$ МПа; б – при $p_k = 0,139$ МПа

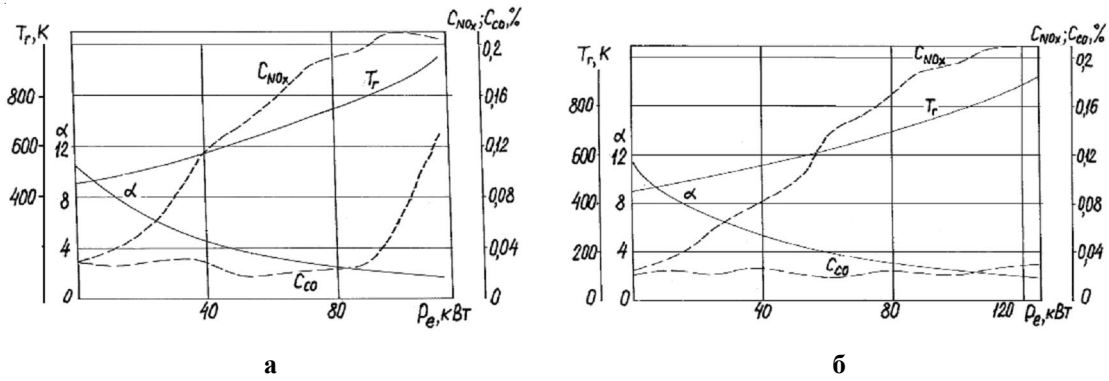


Рис. 2. Нагрузочные характеристики отсека:
 а – при $p_k = 0,179$ МПа; б – при $p_k = 0,218$ МПа

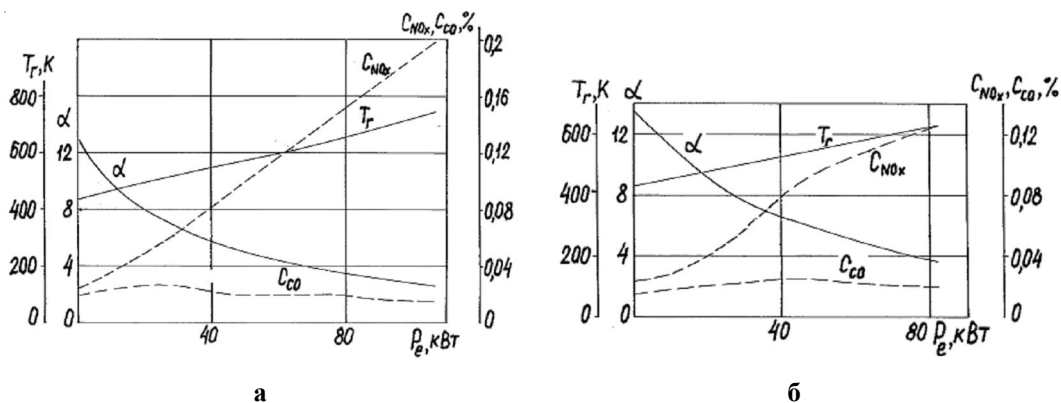


Рис. 3. Нагрузочные характеристики отсека:
 а – при $p_k = 0,179$ МПа; б – при $p_k = 0,218$ МПа

Для расчетного исследования неустановившихся режимов работы комбинированного двигателя была составлена математическая модель дизеля 16ЧН26/26 при работе в качестве привода генератора переменного тока в составе энергетической установки тепловоза 2ТЭ116 [1–3]. Основу динамической модели дизеля составили дифференциальные уравнения поршневой части, турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов. Модель транспортного средства в целом содержала также модели тяговых электрических машин трансмиссии (генератора и электродвигателей привода колес) и модель поезда [3].

Для оценки экологических показателей дизеля 16ЧН26/26 на неустановившихся режимах при моделировании движения тепловоза по результатам экспериментальных исследований дизеля были получены функциональные зависимости для концентраций токсичных компонентов отработавших газов: оксидов азота C_{NOx} , % и оксида углерода C_{CO} , %. Функцио-

нальные зависимости представлены в виде полиномов, в которых независимыми переменными являются коэффициент избытка воздуха α и температура отработавших газов T_r .

Поверхности полиномов токсичных компонентов отработавших газов приведены на рисунке 4 для концентрации оксида азота C_{NOx} и на рисунке 5 – для концентрации оксида углерода C_{CO} .

Составление полиномов, описывающих изменения концентраций токсичных компонентов отработавших газов дизеля по оксидам азота и оксиду углерода, позволило проанализировать динамику выбросов этих токсичных веществ в переходных процессах при изменении управляющего и возмущающего воздействий на энергетическую установку тепловоза.

На рисунке 6 приведены переходные процессы изменения частоты вращения вала дизель-генератора n_d , расхода топлива G_T , расхода оксидов азота G_{NOx} и расхода оксида

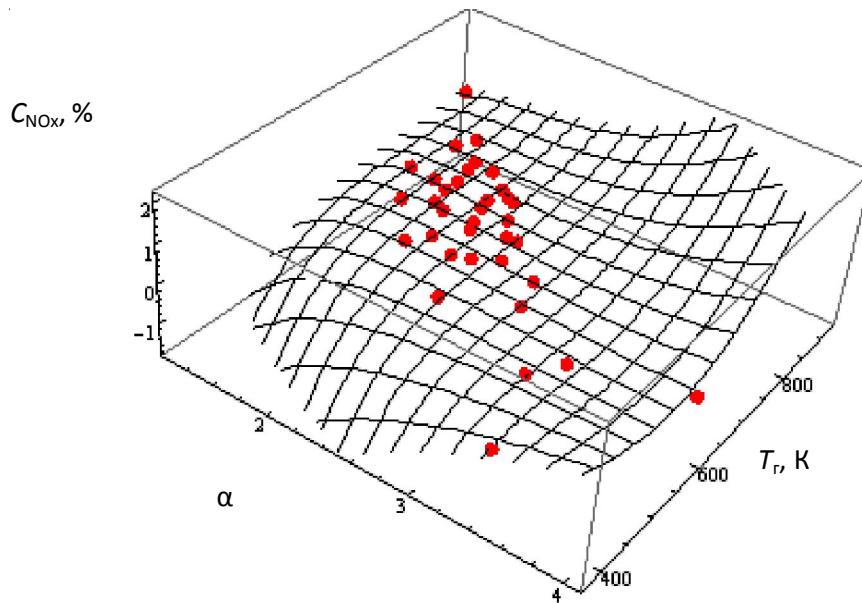


Рис. 4. Поверхность полинома для C_{NOx}

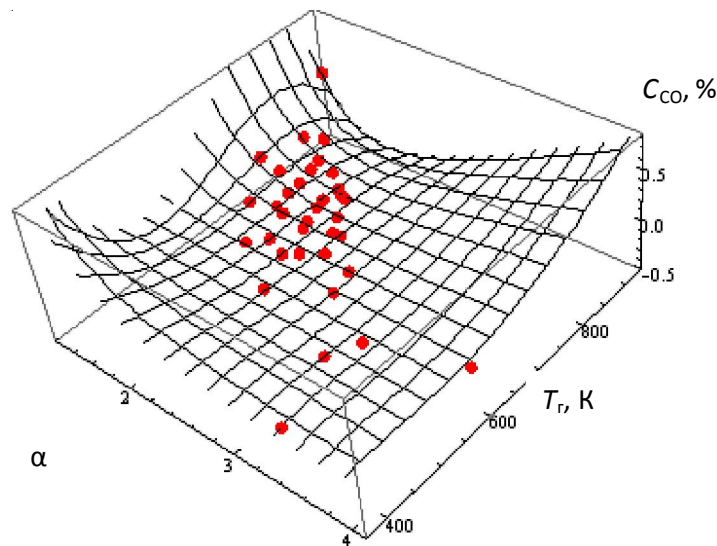


Рис. 5. Поверхность полинома для C_{CO}

углерода G_{CO} при переводе контроллера машиниста тепловоза на позиции $N = 1 - 8 - 14$ (повышение номера позиции контроллера машиниста соответствует увеличению мощности и частоты вращения вала дизеля по тепловозной характеристике).

На рисунке 7 показаны переходные процессы изменения частоты вращения, расходов топлива и рассматриваемых токсичных компонентов при изменении момента сопротивления движению на восьмой и четырнадцатой позициях контроллера машиниста. Момент сопротивления сначала увеличивался на

$\Delta M_C = 15\,000$ Нм, а затем снижался до первоначального уровня. Увеличение момента сопротивления на восьмой позиции проводилось на 80-й секунде, уменьшение – на 105-й секунде от начала моделирования, на четырнадцатой позиции – на 180-й и 220-й секундах соответственно.

На графиках переходных процессов на рисунках 6 и 7 дана единая шкала для значений всех приведенных параметров. Числовые значения шкалы соответствуют частоте вращения вала дизель-генератора. При определении расходов топлива и токсичных компонентов отра-

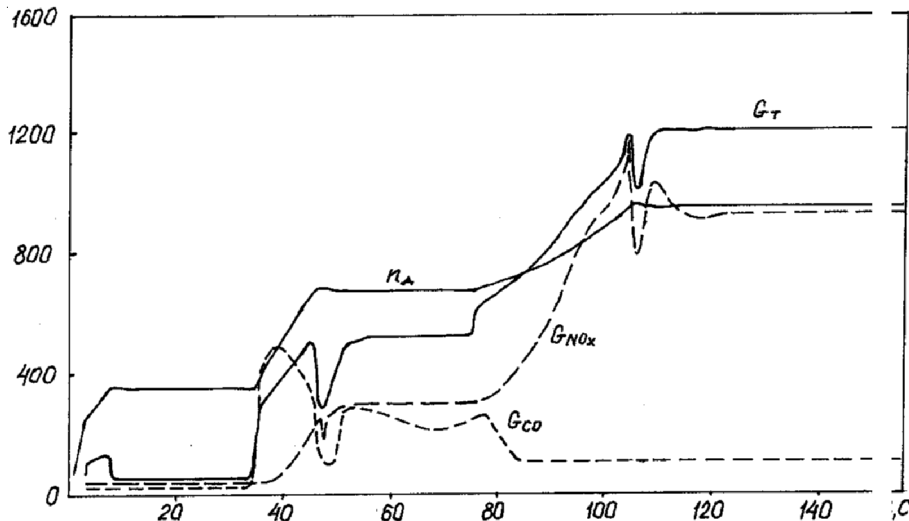


Рис. 6. Процессы изменения расходов топлива, оксидов азота и оксидов углерода при переводе КМ на позиции N = 1 – 8 – 14

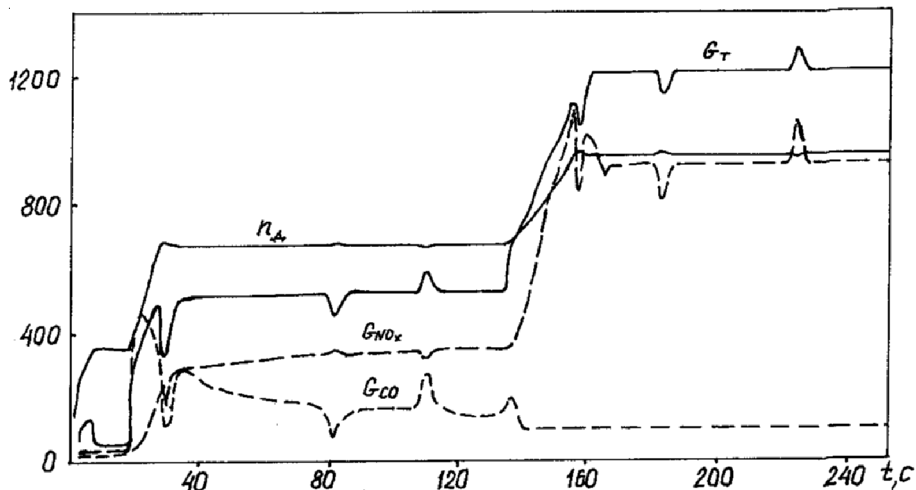


Рис. 7. Процессы изменения расходов топлива, оксидов азота и оксидов углерода при изменении момента сопротивления движению на позициях КМ N = 8 и N = 14

ботавших газов дизеля в кг/с необходимо использовать следующие множители: для расхода топлива – 10^{-4} , для расхода оксидов азота – 10^{-5} , для расходов оксида углерода – 10^{-6} .

Анализ процессов на рисунках 6 и 7 показывает следующее. При переходе с первой на восьмую позицию контроллера машиниста регулятор дизеля быстро увеличивает подачу топлива при недостаточном количестве надвучного воздуха из-за инерционности турбокомпрессора. На начальном этапе перехода происходит резкое увеличение выбросов оксида углерода в связи с ухудшением процесса сгорания топлива и снижением коэффициента избытка воздуха. В дальнейшем происходит раскрутка турбокомпрессора и увеличение расхо-

да воздуха, поступающего в цилиндры дизеля. Процесс сгорания улучшается, концентрация и расход CO с отработавшими газами снижается. Расход оксидов азота увеличивается пропорционально расходу топлива и воздуха.

При переходе с восьмой на четырнадцатую позицию контроллера машиниста снабжение дизеля воздухом достаточно хорошее, процесс сгорания протекает при высокой температуре, что приводит к снижению выбросов оксида углерода и увеличению образования оксидов азота.

Изменение момента сопротивления движению приводит к временному изменению расхода топлива на период переходного процесса стабилизации частоты вращения вала

и мощности дизель-генератора. Изменение расхода топлива более заметно сказывается на образовании оксида углерода на восьмой позиции контроллера машиниста, а на образовании оксидов азота – на четырнадцатой позиции контроллера машиниста.

Это объясняется условиями протекания рабочего процесса дизеля: на восьмой позиции контроллера машиниста изменение расхода топлива сопровождается изменением коэффициента избытка воздуха, но не приводит к заметному изменению максимальной температуры сгорания. На четырнадцатой позиции контроллера машиниста изменение температуры сгорания более значительно и влияет на образование оксидов азота.

Проведенное экспериментальное исследование дизеля с имитацией неустановившихся режимов позволяет оценить показатели токсичности отработавших газов в переходных процессах и проанализировать влияние на эти показатели параметров рабочего процесса дизеля с турбонаддувом.

Предложенная математическая модель комбинированного двигателя дает возможность рассчитывать работу дизеля на неустановившихся режимах с определением выбросов токсичных компонентов отработавших газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боковиков, А. Н. Математическая модель системы воздухоснабжения автомобильного дизеля для полунатурного моделирования его динамических режимов / А. Н. Боковиков, А. Г. Кузнецов // *Грузовик*. – 2009. – № 11. – С. 30–33.
2. Кузнецов, А. Г. Динамическая модель дизеля / А. Г. Кузнецов // *Автомобильная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 30–33.
3. Кузнецов, А. Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза / А. Г. Кузнецов // *Вестник МГТУ. Машиностроение*. – 2009. – № 3. – С. 49–56.
4. Кулешов, А. С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 64 с.
5. Кулешов, А. С. Расчетное формирование оптимальных законов управления дизелями на традиционных и альтернативных топливах / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов // *Безопасность в техносфере*. – 2007. – № 5. – С. 30–32.

6. AVL FIRE® Product description. – Electronic data. – Mode of access: <http://www.avl.com/web/ast/fire> (date of access: 10.02.2014). – Title from screen.

7. DIESEL-RK is an engine simulation tool. – Electronic data. – Mode of access: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (date of access: 10.02.2014). – Title from screen.

8. KIVA-4, Los Alamos National Laboratory. – Electronic data. – Mode of access: <http://www.lanl.gov/orgs/tt/license/software/kiva/> (date of access: 10.02.2014). – Title from screen.

9. Lauer, T. CFD Helps make engines more efficient / T. Lauer // *Dynamics*. – 2012. – Iss. 12.01. – P. 35–36.

REFERENCES

1. Bokovikov A.N., Kuznetsov A.G. Matematicheskaya model sistemy vozdukhosnabzheniya avtomobilnogo dizelya dlya polunaturnogo modelirovaniya ego dinamicheskikh rezhimov [The Mathematical Model of the Air Supply System for Automotive Diesel for Scaled-Down Simulation of Its Dynamic Modes]. *Gruzovik*, 2009, no. 11, pp. 30-33.
2. Kuznetsov A.G. Dinamicheskaya model dizelya [The Dynamic Model of Diesel Engine]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2010, no. 2, pp. 30-33.
3. Kuznetsov A.G. Dinamicheskaya model energeticheskoy ustanovki teplovoza [The Dynamic Model of the Power Plant Diesel Locomotive]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 2009, no. 3, pp. 49-56.
4. Kuleshov A.S., Grekhov L.V. *Matematicheskoe modelirovanie i kompyuternaya optimizatsiya toplivopodachi i rabochikh protsessov dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Mathematical Modeling and Computer Optimization of Fuel Injection and Workflows of Internal Combustion Engines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 64 p.
5. Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Raschetnoe formirovanie optimalnykh zakonov upravleniya dizelyami na traditsionnykh i alternativnykh toplivakh [The Calculated Formation of Optimal Laws of Diesel Control on Conventional and Alternative Fuels]. *Bezopasnost v tekhnosfere*, 2007, no. 5, pp. 30-32.
6. AVL FIRE® Product Description. Available at: <http://www.avl.com/web/ast/fire> (accessed February 10, 2014).
7. DIESEL-RK Is an Engine Simulation Tool. Available at: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (accessed February 10, 2014).
8. KIVA-4, Los Alamos National Laboratory. Available at: <http://www.lanl.gov/orgs/tt/license/software/kiva/> (accessed February 10, 2014).
9. Lauer T. CFD Helps Make Engines More Efficient. *Dynamics*, 2012, iss. 12.01, pp. 35-36.

**INVESTIGATION OF DIESEL EXHAUST GAS TOXICITY
ON TRANSIENT MODES**

Ivashchenko Nikolay Antonovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department E-2,
Bauman Moscow State Technical University
ivaschen@mail.ru
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

Kuznetsov Aleksandr Gavriilovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department E-6,
Bauman Moscow State Technical University
kuzag441@mail.ru
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

Vornychev Dmitriy Sergeevich

Postgraduate Student,
Department E-6,
Bauman Moscow State Technical University
kuzag441@mail.ru
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

Furman Viktor Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences,
General Director, Chief Engineer,
Ltd. "PPP Dizelavtomatika"
kuzag441@mail.ru
Chernyshevskogo N.G. St., 109, 410017 Saratov, Russian Federation

Abstract. Currently, the generation of heat engines and their control systems are based on ecological indices such as the toxicity of the fulfilled gases. When designing motors, software packages are widely used. These software packages provide the ability to calculate the workflow of engine at steady-state conditions. The definition of indicators emissions is a difficult task. The distribution statistics of the modes shows that the engines of the transport units work on unsteady modes most of the time. The calculation of toxicity indicators is even less developed.

In this article experimental and numeric study of the diesel engine with turbocharger exhaust toxicity was considered.

As a result of the experimental study, which was conducted with single-cylinder diesel engine compartment simulated work on the transient state, working process characteristics of a diesel engine were obtained, including carbon and nitrogen oxides concentrations.

Functional dependencies of concentrations of toxic exhaust components, such as carbon and nitrogen oxides, on excess air ratio and exhaust temperature were obtained.

Diesel engine transient processes were simulated using developed mathematical dynamic model of combined engine in locomotive power plant with a change in control signal (position of locomotive driver's controller) and external influence signal (resistance moment). The analysis of exhaust gas toxicity was conducted.

Key words: diesel engine, toxicity of exhaust gases, concentration of toxic components, power plant diesel locomotive, mathematical model.