



ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 621.43.068.5

В.Ф. КАМЕНЕВ, д-р техн. наук, профессор
ведущий эксперт¹
E-mail: kamovf@mail.ru

П.А. ЩЕГЛОВ
аспирант, инженер¹

Г.Г. НАДАРЕЙШВИЛИ, канд. техн. наук
руководитель управления¹

¹ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 19.04.2016.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОГО ДИЗЕЛЯ С КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМОЙ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

В статье рассматриваются принципы математического моделирования термодинамических и газодинамических процессов в современном дизельном двигателе и в системах снижения содержания вредных веществ в отработавших газах до нормативных требований ЕВРО-5 и ЕВРО-6.

Ключевые слова: математическое моделирование, дизель, вредные выбросы, оксиды азота, дисперсные частицы, окислительный нейтрализатор DOC, фильтр улавливания дисперсных частиц DPF, регенерация фильтра, SCR-нейтрализатор

Регламентируемые Правилами 49.06 ЕЭК ООН нормативные требования ЕВРО-6 по ограничению выброса дизельными двигателями вредных веществ, в частности оксидов азота и дисперсных частиц, содержащих канцерогенные вещества, не могут быть выполнены без использования комплекса антитоксичных мер по оптимизации рабочего процесса и очистки отработавших газов (ОГ) в системе выпуска.

Комплексная антитоксичная система для снижения вредных выбросов подразумевает наличие в рабочем процессе дизеля наддува воздуха с промежуточным охлаждением и двухконтурной регулируемой рециркуляции отработавших газов. На выпуске дизеля устанавливается окислительный нейтрализатор в блоке с сажевым фильтром для улавливания и обезвреживания дисперсных частиц углерода и нейтрализатор селективного каталитического восстановления оксидов азота [1, 2].

Эффективная работа расположенных на выпуске дизеля перечисленных выше устройств очистки

ОГ строго определяется температурным режимом их реакционных камер, а значит, температурами ОГ на входе в них. При снижении температуры ОГ ниже 250 °С теряется способность конверсии вредных веществ, а при температурах выше 900 °С происходит так называемое термическое старение подложки катализатора и при дальнейшем нарастании температуры возможно разрушение или оплавление блока нейтрализатора или сажевого фильтра. Именно поэтому необходимо поддерживать указанный оптимальный диапазон температур сажевого фильтра и нейтрализаторов на эксплуатационных режимах работы дизеля. Температура ОГ на выходе из двигателя снижается в процессе движения в каналах и полостях выпускного тракта и расположенных в нем антитоксичных устройствах. Поэтому при проектировании системы выпуска дизеля большое внимание следует уделять расчету термодинамического состояния ОГ на выходе из двигателя и в процессе их движения в выпускном газопроводе и расположенных в нем элементах си-

стемы нейтрализации. На этом этапе необходима также разработка достоверной методики термодинамического расчета состояния отработавших газов как теплоносителя для обеспечения эффективной конверсии вредных веществ в рабочих камерах DOC-нейтрализатора, сажевого фильтра и в блоке селективного каталитического разложения (SCR) оксидов азота.

На рисунке 1 представлен один из вариантов принципиальной схемы КАТС для отечественного дизеля, который, по нашему мнению, обеспечит выполнение нормативных требований ЕВРО-5 и выше без ухудшения технико-экономических показателей и, главное, в сложных климатических и дорожных условиях Российской Федерации.

Для данного двигателя создан компьютерно-имитационный комплекс для расчета и аналитических исследований его рабочего цикла и процессов, происходящих во впускной и выпускной системах. За основу взяты разработанные ранее во ФГУП «НАМИ» и МГТУ «МАМИ» программы расчета рабочих процессов двигателей с принудительным зажиганием и дизелей [2, 4, 5]. Разработанное математическое описание термо- и газодинамических процессов во впускном, выпускном трактах и цилиндрах современного малотоксичного среднеразмерного дизеля дополняет взятую за основу обобщенную математическую модель. Оно включает изменения, связанные с введением в КАТС дизеля элементов обезвреживания ОГ, расположенных в системе выпуска: нейтрализаторов окислительного и восстановительного типа, сажевого фильтра дисперсных частиц с системой регенерации и селективного каталитического разложения SCR оксидов азота. Для согласования работы всех систем используется электронный блок управления (ЭБУ), считывающий сигналы от датчиков и выдающий управляющие сигналы. В ЭБУ заложено программное обеспечение, разработанное на основе математического моделирования рабочего цикла двигателя, термодинамических и термохимических процессов в антиоксидных системах и устройствах, расположенных в выпускной системе.

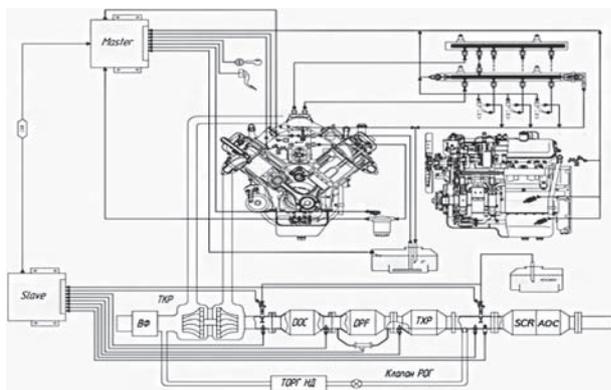


Рисунок 1 — Перспективная комплексная антиоксидная система с электронным управлением для отечественных дизелей типа ЯМЗ-6566

В частности, на основе математического моделирования производится оптимальное дозирование подачи дополнительного топлива перед DOC-нейтрализатором и подачи раствора мочевины на вход в SCR-нейтрализатор. На основе принципиальной схемы (см. рисунок 1) КАТС была разработана расчетная схема (рисунок 2). Она предназначена для описания моделирования термодинамических процессов в газовом тракте дизеля на пути от воздушного фильтра до впускных клапанов в цилиндрах двигателя и в элементах, расположенных в выпускном тракте, в том числе в системах и устройствах очистки ОГ.

В приведенной расчетной схеме газового тракта дизеля участки трубопроводов и элементы систем и устройств заменяются моделями или экспериментальными матрицами (в квадратах) происходящих в них термодинамических и термохимических процессов.

Задача аналитических исследований заключается в предварительном определении температуры и состава ОГ на выходе из двигателя на основных режимах работы двигателя и путей сохранения тепловой энергии на пути к окислительному нейтрализатору, сажевому фильтру и SCR-нейтрализатору. Это повысит эффективность работы системы и позволит оптимизировать подачу мочевины на вход в SCR-нейтрализатор. Разумеется, поиск решений столь сложной задачи требует большого объема работ по математическому моделированию и расчетно-экспериментальным исследованиям. Программа и алгоритм исследования были сформированы с учетом особенностей термодинамических явлений в системе «впускной тракт — двигатель — выпускной тракт» и обеспечили возможность прогнозирования эффективности возможных конструктивных решений. С этой целью создан компьютерный расчетно-аналитический имитационный комплекс, включающий в себя два взаимосвязанных функционирующих блока расчетов (рисунок 3). Блок 1 расчета рабочего цикла ДВС определяет динамику изменения температуры ОГ на выходе из рабочего пространства, а блок 2 расчета выпускной системы ДВС определяет характер изменения температурно-энергетического потенциала отработавших газов как греющего теплоносителя в элементах выпускного тракта с учетом

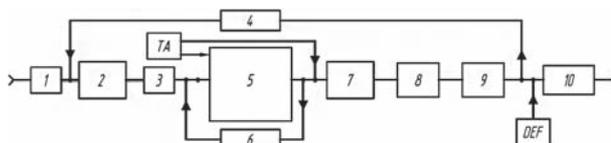


Рисунок 2 — Схема для математического моделирования:
1 — воздушный фильтр; 2 — компрессор ТКР;
3 — теплообменник охлаждения наддувочного воздуха;
4 и 6 — контуры рециркуляции ОГ низкого и высокого давления; 5 — дизель; 7 — турбина ТКР; 8 — окислительный нейтрализатор DOC; 9 — сажевый фильтр DPF;
10 — SCR-нейтрализатор; TA — топливная аппаратура;
DEF — модуль подачи раствора мочевины

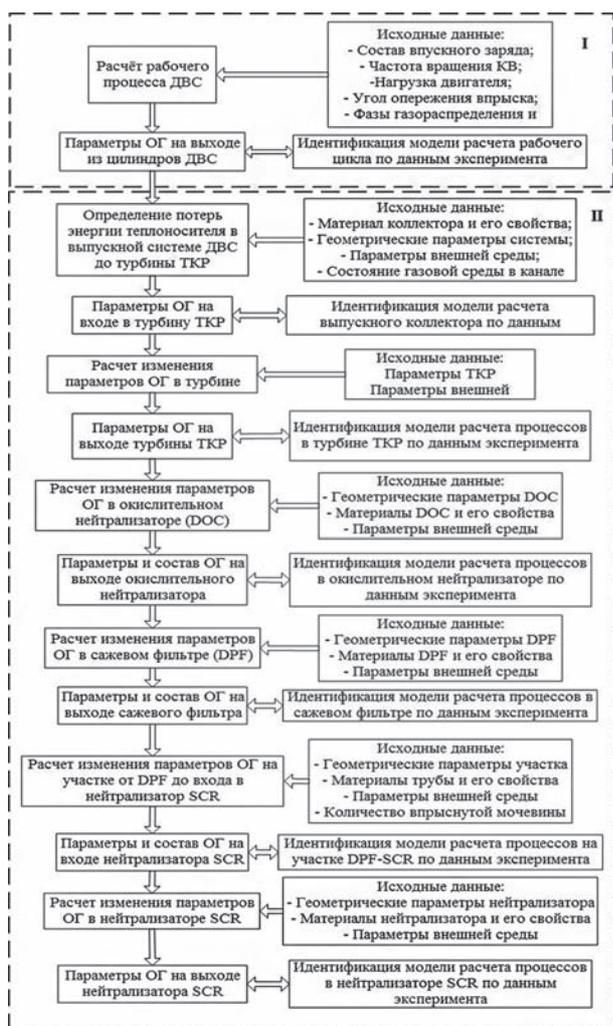


Рисунок 3 — Алгоритм расчета системы «двигатель — выпускной тракт»

интенсивности отвода теплоты через стенки всех элементов в окружающую среду и выделения/поглощения тепла в результате протекания реакций в элементах очистки ОГ. Это позволяет еще на стадии проектирования конструкции системы выпуска дизельного двигателя предварительно определить габаритные размеры и расположение в ней элементов системы нейтрализации ОГ и оптимизировать эффективность их работы при сертификационных испытаниях дизеля по принятым регламентом Правил ЕЭК ООН 49.06 циклами испытаний.

Логическая последовательность проведения расчета температур ОГ в системе «двигатель — выпускной тракт» приведена на рисунке 3. На базе этого алгоритма для проведения расчетно-теоретических исследований были разработаны математические модели и программы расчета параметров рабочего цикла дизеля на базе рассмотренных и представленных на рисунке 1 принципиальной схемы КАТС и расчетной схемы на рисунке 2.

Расчеты, проводимые в первом блоке (выделены пунктирной линией и отмечены индексом I), являются предварительными и имеют целью

определение параметров теплоносителя — отработавших газов на выходе из двигателя, в основном их состава и теплофизических характеристик: теплосодержания (энтальпии, температуры), содержания кислорода, оксидов азота, дисперсных частиц углерода и других продуктов полного и неполного сгорания топлива. Эта методика позволяет получить исходные данные, которые должны быть введены на вход второго модуля расчета. Хотя в принципе при достаточной базе экспериментальных исследований дизеля можно воспользоваться полученными из них данными для прямого ввода в программу второго модуля расчета.

В ФГУП «НАМИ» разработано и используется несколько методов моделирования и расчета рабочего цикла дизельного двигателя, разработанных Звоновым В.Ф. [5], Фоминым В.М. совместно с Каменевым В.Ф. [4]. Однако наиболее оптимальной, по нашему мнению, для решения задач по первому блоку расчета дизеля и получения необходимых данных для расчета по второму модулю, является разработанная в ФГУП «НАМИ» модернизированная методика расчета по методу Гриневецкого—Мазинга [3] с учетом современных систем турбонаддува и рециркуляции отработавших газов. Используемые в этой методике расчета дизеля математические модели основаны на хорошо известных законах термодинамики и рассматривают состояние рабочего тела в двигателе как открытую термодинамическую систему, обменивающуюся массой и энергией с остальными системами двигателя.

Второй блок расчета (выделен на рисунке 3 пунктирной линией и отмечен индексом II) позволяет определять характер изменения температурно-энергетического потенциала ОГ как греющего теплоносителя в элементах выпускного тракта. При этом температура ОГ $T_{вх.ог}$ на входе в блок окислительного нейтрализатора в комплексе с сажевым фильтром в значительной степени определяет интенсивность подвода тепловой энергии к активной зоне реакторов «фильтра-нейтрализатора», определяя эффективность (полноту) процессов экзотермического окисления присадки дополнительного топлива и продуктов неполного сгорания СО и СН в окислительном блоке нейтрализатора и дожигания углеродных дисперсных частиц в блоке фильтра-накопителя.

Для увеличения точности расчета необходимо знать интегральный баланс энергетических потоков в обоих блоках, который исходя из закона сохранения энергии складывается из равенства нулю алгебраической суммы всех источников и расходов энергии при рассмотрении в стационарном режиме:

$$Q_{внос} + Q_{ог} + Q_{хим} + Q_{унос} + Q_{пот} = 0.$$

Рассмотрим все слагаемые баланса. Вносимая с реагентами на вход комплекса «фильтра-нейтрализатора» тепловая мощность ($Q_{внос}$) складывается из суммы произведений полных энтальпий реаген-

тов при температуре входа в реактор на их индивидуальный расход:

$$Q_{\text{внос}} = \sum L_i \cdot I_i,$$

где L_i — расход i -го реагента, моль/с; I_i — полная энтальпия i -го реагента на входе в комплекс, Дж/моль.

Тепловая мощность $Q_{\text{ог}}$ (Дж/с, Вт), передаваемая в рабочую полость комплекса реакторов нейтрализатора и фильтра-накопителя от греющего теплоносителя (отработавших газов двигателя) определяется следующим уравнением:

$$Q_{\text{ог}} = L_{\text{ог}} \cdot C_p^{\text{ог}} \cdot (T'_{\text{ог}} - T''_{\text{ог}}),$$

где $L_{\text{ог}}$ — расход греющего теплоносителя (отработавших газов), моль/с; $C_p^{\text{ог}}$ — средняя изобарная теплоемкость ОГ, Дж/моль·град; $T'_{\text{ог}}$ — температура ОГ газов на входе в рабочую полость реакторов нейтрализатора и фильтра-накопителя; $T''_{\text{ог}}$ — то же на их выходе.

Тепловая мощность отработавших газов в основном зависит от их средней теплоемкости и температуры. Диапазон рабочих температур нейтрализатора составляет 300...800 °С. Перечисленные параметры отработавших газов как греющего теплоносителя в значительной степени определяют эффективность теплообмена в реакторе, а, следовательно, тепловой режим конверсионного процесса. При изменении режима работы двигателя состав ОГ изменяется. Одновременно с этим меняются теплофизические свойства компонентов газовой смеси, что необходимо учитывать при определении средних по составу значений этих параметров (средняя теплоемкость, плотность, теплопроводность и показатели вязкости продуктов сгорания двигателя). Тепловой эффект химической реакции определяется как произведение теплового эффекта реакции одного моля реагента на его расход:

$$Q_{\text{хим}} = \sum L_i S_{gn}(\Delta H_{\text{хим}}),$$

где L_i — расход i -го реагента, моль/с; $S_{gn}(\Delta H_{\text{хим}})$ — тепловой эффект одного моля вещества в реакции, Дж/моль.

$$S_{gn}(\Delta H_{\text{хим}}) = \begin{cases} (-1) \cdot \Delta H_{\text{хим}} & \text{при } Q < 0 \\ (+1) \cdot \Delta H_{\text{хим}} & \text{при } Q > 0 \end{cases}.$$

При экзотермическом характере реакций окисление продуктов неполного сгорания оксидов углерода и углеводородов $Q > 0$. То же самое будет наблюдаться и при подводе на вход комплекса дополнительного топлива. Это повысит температуру отработавших газов в период регенерации фильтра до требуемых 600–700 °С, что позволит выжечь за короткий период все накопленные в структуре кордиеритового блока углеводородсодержащие дисперсные частицы. В период регенерации фильтра состав газовой смеси, проходящий через каталитический блок нейтрализатора DOC обогащается, что провоцирует процесс

восстановления оксида азота до молекулярного азота при эндотермическом (с потреблением тепла) характере реакций $Q < 0$. Таким образом, уже на этом этапе начинается частичное снижение содержания в отработавших газах оксидов азота.

Уносимая из реакторов с отработавшими газами тепловая мощность (вычисляется аналогично $Q_{\text{внос}}$) берется со знаком «-»:

$$Q_{\text{унос}} = \sum L_j \cdot I_j,$$

где L_j — расход j -го продукта реакции, моль/с; I_j — полная энтальпия j -го продукта реакции на выходе из реактора, Дж/моль.

Энергия, растрчиваемая на потери в окружающую среду, также берется со знаком «-», вычисляется индивидуально для всего комплекса реакторов и является функцией средней температуры внешней стенки корпуса «фильтра-нейтрализатора», Вт:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}(< T_f >).$$

Потери теплоты в окружающую среду следует учитывать через стенки комплекса «фильтра-нейтрализатора» и при течении отработавших газов во впускном тракте до и после него. При расчете тепловой мощности, вносимой в комплекс и уносимой из него, необходимо иметь значения полных энтальпий исходных реагентов и продуктов реакции.

Термодинамический расчет SCR-нейтрализатора, который обеспечивает восстановление NOx до нейтральных N₂ аммиаком и частично изоциановой кислотой, получаемых в выпускном патрубке на входе в него путем термического разложения раствора мочевины, проводится аналогично расчету блока «сажевый фильтр — окислительный нейтрализатор». При этом следует учитывать, что разложение мочевины на участке гидролиза происходит с эндотермическим эффектом. Поэтому на этом участке трубопровода температура ОГ и затем реакторной полости SCR-нейтрализатора не должна опускаться ниже 600 °С. Если не соблюдать это условие, то возможен проскок через SCR-нейтрализатор непрореагировавшего аммиака и выброс этого ядовитого вещества в окружающую среду. Оптимизация всего этого процесса зависит от совершенства заложенного в ЭБУ программного обеспечения.

Значения температур, а, следовательно, и вносимая в реакторы с реагентами тепловая мощность определяются во многом степенью тепловых потерь в выпускных трубах на первом участке пути от выхода из турбокомпрессора к «фильтру-нейтрализатору» и на втором участке трубопровода к SCR-нейтрализатору.

С учетом того, что целевой задачей расчетного исследования является определение осредненной за период выпуска температуры отработавших газов в выпускном трубопроводе, расчет соединительных участков можно проводить с использованием уп-

рощенной методики, позволяющей достаточно достоверно определить усредненную величину данного параметра. Процесс передачи теплоты по длине соединительных участков выпускного трубопровода является нестационарным и происходит путем конвекции, теплопроводности и излучением. Поэтому для решения такой задачи нестационарного теплообмена по длине выпускного трубопровода можно использовать дифференциальное уравнение Фурье в частных производных и численные методы вычислений. Для расчета термодинамических процессов в выпускной системе и в частности расчета соединительных элементов выпускного трубопровода использовался модифицированный метод конечных элементов, когда расчетный элемент трубопровода разбивается на отдельные участки. Уровень температуры газа в выходном сечении расчетного участка зависит от количества тепла, внесенного с газом от предшествующего элемента выпускной системы. Температура стенки трубы обуславливается теплотой, внесенной через ее входное сечение, теплотой, переданной конвекцией от газа в стенки, теплотой, отданной от стенки трубы в окружающую среду путем конвекции и излучения, и теплотой, унесенной потоком через выходное сечение. Таким образом, зная параметры газа во входном сечении (для первого участка в нашем случае это определенная на предыдущем этапе расчета температура отработавших газов на выходе турбокомпрессора) можно определить температуру газов в его выходном сечении. Причем температура газа в выходном сечении данного участка является входным параметром для следующего участка трубопровода. Влияние изгиба трубы на процесс теплопередачи может быть учтено с помощью соответствующего коэффициента. Идентификация (корректировка принятых значений коэффициентов) и проверка достоверности расчетной методики проводились с использованием термометрирования в процессе экспериментальных исследований. Более подробно математическое описание и методика расчета теплообмена в соединительных участках выпускного трубопровода описана в работах Фомина В.М., Надарейшвили Г.Г. и Каменева В.Ф. [5, 6].

Таким образом, зная параметры отработавших газов на входе в каждый соединительный участок выпускного трубопровода можно определить температуру в его выходном сечении. Влияние разветвлений и изгибов трубопроводов выпускной системы двигателя на процесс теплопередачи может быть учтено с помощью эмпирического коэффициента:

$$F_b = \frac{Nu_{bent-pipe}}{N_{и}} = 1 + \frac{21D_{in}}{Re^{0.14} D_{bent}}$$

Приведенные выше методика и программа расчета позволяют оптимизировать необходимое количество теплоты, обеспечивающей протекание реакций конверсии вредных компонентов отработавших газов двигателя на активной поверхности каталитических блоков, что, в свою очередь, необходимо для расчета параметров теплообмена между внешним источником теплоты и реакторной камерой для выбранной конструкции «филтра-нейтрализатора» и его каталитических блоков и для реакторной полости комплекса «SCR-нейтрализатор» или при известном значении теплоты, вносимой отработавшими газами, уточнить конструктивные параметры этих комплексов, в частности каталитических блоков и состава выбранного катализатора.

Список литературы

- 1 Каменев, В.Ф. Перспективы улучшения токсических показателей дизельных двигателей автотранспортных средств массой более 3,5 т / В.Ф. Каменев, А.А. Демидов, П.А. Шеглов // Тр. НАМИ: сб. науч. ст. — М., 2014. — Вып. № 256. — С. 5–24.
- 2 Тенденция развития систем обработки отработавших газов современных автомобилей / Р.И. Рахматов [и др.] // Естественные и технич. науки. — 2014. — № 6(74). — С.92–96.
- 3 Якунин, Р.В. Влияние степени рециркуляции выпускных / отработавших газов на термодинамические характеристики рабочего цикла дизельного двигателя / Р.В. Якунин // Тр. НАМИ: сб. науч. ст. — М., 2014. — Вып. № 255. — С. 67–72.
- 4 Расчеты рабочих циклов поршневого и комбинированного двигателей внутреннего сгорания / В.Ф. Каменев [и др.]. — М.: МАМИ, 2006. — 29 с.
- 5 Звонов, В.А. Методика расчета рабочего процесса и образования оксидов азота в цилиндре дизеля с неразделенной камерой сгорания / В.А. Звонов, Г.С. Корнилов, Л.С. Заиграев // Тр. НАМИ: сб. науч. ст. — М., 1999. — Вып. № 224. — С. 205–221.

KAMENEV Vladimir F., Dr. Tech. Sc., Professor

Leading Expert¹

E-mail: kamovf@mail.ru

SHCHEGLOV Pavel A.

Post-Graduate Student, Engineer¹

NADAREYSHVILI Givi G., Cand. Tech. Sc.

Head of Administration¹

¹The Central Research and Development Automobile and Engine Institute “NAMI”, Moscow, Russia

PRINCIPLES OF THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF A MODERN DIESEL ENGINE WITH AN INTEGRATED HARMFUL EMISSIONS REDUCE SYSTEM

The article discusses principles of mathematical modeling of thermal and gas-dynamic processes in a modern diesel engine and systems reducing the content of harmful substances in the exhaust gases to the EURO-5 and EURO-6 requirements. Integrated system for neutralization of harmful emissions implies the presence of charge air intermediate cooling system and two-conduit regulated exhaust gas recirculation system in the diesel system. The exhaust system includes a block oxidation catalytic, a block of capture and neutralization of disperse particles with a regeneration system and a selective catalytic reduction system for the nitrogen oxides neutralization.

Keywords: mathematical modeling, diesel engine, emission, nitrogen oxides, soot particles, oxidation catalyst DOC, particulate filter DPF, regeneration system, SCR-converter

References

1. Kamenev V.F., Demidov A.A., Scheglov P.A. Perspektivy uluchsheniya toksicheskikh pokazatelej dizel'nyh dvigatelej avtotransportnyh sredstv massoj bolee 3,5 t [Prospects for improving the performance of toxic diesel vehicles weighing more than 3,5 tonnes]. *Trudy NAMI: sb. nauch. st.* [Proc. The Central research and development automobile and engine institute NAMI: collection of scientific articles]. Moscow, 2014, no. 256, pp. 5–24.
2. Nadarejshvili G.G., Rahmatov R.I., Galevko V.V., Judin S.I. Tendencija razvitija sistem obrabotki otrabotavshih gazov sovremennyh avtomobilej [The trend in development of modern cars exhaust gas treatment systems]. *Estestvennye i tehnicheckie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2014, no. 6(74), pp. 92–96.
3. Yakunin R.V. Vlijanie stepeni recirkuljacii vypusnyh / otrabotavshih gazov na termodinamicheskie harakteristiki rabocheho cikla dizel'nogo dvigatelja [Influence of the degree of recirculation of the exhaust on the thermodynamic characteristics of the diesel engine cycle]. *Trudy NAMI: sb. nauch. st.* [Proc. The Central research and development automobile and engine institute NAMI: collection of scientific articles]. Moscow, 2014, no. 255, pp. 67–72.
4. Kamenev V.F., Makarov A.R., Fomin F.M., Hripach N.A. *Raschety rabochih ciklov porshneвого i kombinirovannogo dvigatelej vnutrennego sgoranija* [Calculations cycles and combined piston internal combustion engines]. Moscow, Izd-vo MG TU "MAMI", 2006. 29 p.
5. Zvonov V.A., Kornilov G.S., Zaigraev L.S. Metodika rascheta rabocheho processa i obrazovanija oksidov azota v cilindre dizelja s nerazdelennoj kameroj sgoranija [Method of calculation of the working process and the formation of nitrogen oxides in the cylinder of a diesel engine with an undivided combustion chamber]. *Trudy NAMI: sb. nauch. st.* [Proc. The Central research and development automobile and engine institute NAMI: collection of scientific articles]. Moscow, 1999, no. 224, pp. 205–221.