

УДК 621.43.068.5

Принципы построения математической модели современного малотоксичного дизеля для транспортно-технологических средств и сельхозмашин

Д-р техн. наук В. Ф. КАМЕНЕВ, инж. П. А. ЩЕГЛОВ (ГНЦ РФ "НАМИ", kamovf@mail.ru)

Аннотация. Рассматриваются принципы математического моделирования термодинамических и газодинамических процессов в современном дизельном двигателе и расположенных на выпуске системах снижения содержания вредных веществ: окислительном нейтрализаторе, сажевом фильтре с системой регенерации и нейтрализаторе селективного восстановления оксидов азота.

Ключевые слова: дизель, математическое моделирование, вредные выбросы, оксиды азота, дисперсные частицы, окислительный нейтрализатор, сажевый фильтр, нейтрализатор селективного каталитического восстановления.

Principles for construction of mathematical model of a modern low-toxic diesel engine for transport and technological means and agricultural machines

V. F. KAMENEV, P. A. SCHEGLOV (Central Research and Development Automobile and Engine Institute NAMI, kamovf@mail.ru)

Summary. The article considers the principles of mathematical modeling of thermodynamic and gasdynamic processes in modern diesel engine and in systems intended to reduce the harmful substances level in exhaust gases, namely in oxidation catalytic converter, in particulate filter with regeneration system and in selective catalytic reduction system for nitrogen oxides neutralization.

Keywords: diesel engine, mathematical modeling, pollutant emissions, nitrogen oxides, dispersion particles, oxidation catalytic converter, particulate filter, selective catalytic reduction system.

Регламентируемые Правилами ЕЭК ООН № 49 и 96 нормативные требования по ограничению выброса дизельными двигателями вредных веществ, в частности оксидов азота и дисперсных частиц, не могут быть выполнены без оптимизации рабочего процесса и использования комплекса систем и устройств для очистки отработавших газов (ОГ).

Диапазон эффективной работы устройств для очистки ОГ строго определяется температурным режимом реакционной камеры, а значит, температурами ОГ на входе в них. При температурах ниже 250 °С они теряют способность конверсии вредных веществ, а при температурах выше 900 °С происходит так называемое термическое старение подложки катализатора. При дальнейшем нарастании температуры возможно разрушение или оплавление блока нейтрализатора или сажевого фильтра. Именно поэтому необходимо поддерживать работу нейтрализатора на оптимальных температурных режимах в течение максимального времени. Для этого после холодного пуска двигателя нужно как можно быстрее поднять температуру каталитического блока выше 250 °С и поддерживать ее в диапазоне 300—800 °С на всех эксплуатационных режимах, не давая опуститься ниже 250 °С при минимальных скоростных и нагрузочных режимах двигателя и подняться выше 900 °С при его максимальных режимах.

Температура реакционного пространства этих устройств зависит от температуры ОГ на выходе из двигателя и снижается в процессе их движения по каналам и полостям выпускного тракта и расположенных в нем устройств. Поэтому важнейшая задача при разработке и оптимизации комплекса систем и устройств, влияющих на образование и нейтрализацию вредных веществ в цилиндрах дизеля и выпускной системе, — создание имитационной модели на основе математического описания термодинамических и термохимических явлений при движении свежего заряда во впускной системе, во время рабочего процесса в цилиндрах и, главное, процессов, происходящих в выпускном газопроводе и расположенных в нем элементах системы нейтрализации вредных веществ по мере прохождения ОГ.

В конечном счете необходимо разработать методологию расчета изменения параметров ОГ как теплоносителя непосредственно в выпускной системе при их термодинамических и термохимических преобразованиях в процессе движения по выпускному трубопроводу и рабочим полостям расположенных в нем устройств: DOC-нейтрализатора, сажевого фильтра и блока SCR селективного каталитического разложения оксидов азота.

В НАМИ проводится ряд работ по созданию дизельного двигателя, отвечающего требованиям Евро-5 и выше, на базе двигателя ЯМЗ-6566 [1, 2]. В рамках этих работ разрабатывается комплексная система снижения

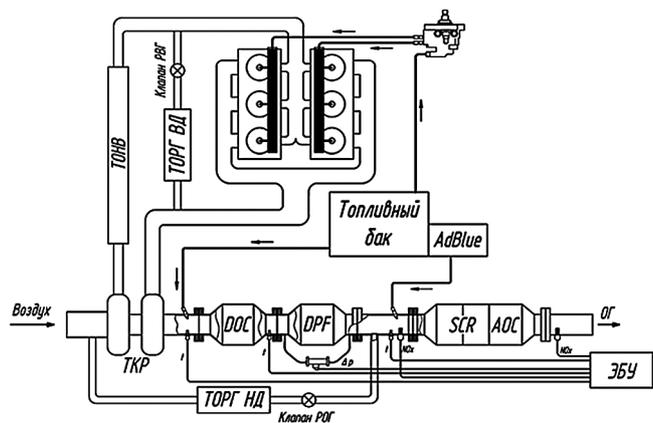


Рис. 1. Комплексная система снижения вредных выбросов, разрабатываемая в НАМИ по проектам "Дизелестроение"

вредных выбросов, принципиальная схема которой показана на рис. 1.

Для данного двигателя целесообразно создание компьютерного имитационного комплекса для расчета и аналитических исследований его рабочего цикла и процессов, происходящих во впускной и выпускной системах. При создании математического аппарата за основу взяты разработанные ранее в НАМИ и МГТУ "МАМИ" программы расчета рабочих процессов двигателей с принудительным зажиганием и дизелей [2–5]. Разработанное математическое описание термо- и газодинамических процессов во впускном и выпускном трактах и цилиндрах современного малотоксичного среднеразмерного дизеля дополняет взятую за основу обобщенную математическую модель. Оно включает изменения, связанные с введением в комплексную антитоксичную систему дизеля элементов, расположенных в системе выпуска: нейтрализатора окислительного типа, сажевого фильтра дисперсных частиц с системой регенерации и селективного каталитического разложения SCR оксидов азота [6].

Двигатель ЯМЗ-6566 с комплексной системой снижения вредных выбросов (см. рис. 1) включает следующие элементы: воздушный фильтр; турбокомпрессор (ТКР); теплообменник охлаждения наддувочного воздуха (ТОНВ); систему рециркуляции отработавших газов высокого (СРОГ ВД) и низкого давления (СРОГ НД) с теплообменником охлаждения рециркулируемых газов; аккумуляторную систему топливоподачи типа Common Rail, включающую две топливные рампы с форсунками, топливный насос высокого давления, топливный бак; окислительный нейтрализатор (DOC); сажевый фильтр (DPF); блок селективного каталитического восстановления (SCR) оксидов азота; бак и модуль впрыска раствора мочевины; электронный блок управления (ЭБУ) с рядом датчиков [6].

Представленная система работает следующим образом. Атмосферный воздух через воздушный фильтр поступает в компрессор ТКР, где его давление повышается на 10–120 % в зависимости от режима работы двигателя. Это позволяет улучшить наполнение цилиндров, процессы смесеобразования и сгорания рабочего заряда смеси. Однако вместе с давлением повышается и тем-

пература наддувочного воздуха, что может значительно нивелировать положительное действие наддува. Для устранения этого эффекта используется ТОНВ, где температура впускного заряда принудительно снижается на 20–70 °С в зависимости от режима работы двигателя.

Топливо под высоким давлением (170 МПа) впрыскивается непосредственно в цилиндры топливной аппаратурой аккумуляторного типа. Для подавления процессов образования оксидов азота в цилиндрах двигателя в ходе рабочего цикла используются СРОГ с контурами высокого и низкого давления и промежуточным охлаждением рециркулируемых газов. Продукты сгорания топлива вытесняются поршнем в выпускную систему, где они совершают дополнительную работу на лопатках турбины ТКР. Благодаря этому происходит полезное использование остаточной энергии ОГ, что повышает КПД двигателя.

В выпускной системе ОГ подвергаются последовательной очистке от нормируемых вредных компонентов. В DOC-нейтрализаторе происходит окисление продуктов неполного сгорания топлива — оксида углерода СО и несгоревших углеводородов СН, а также доокисление оксида азота NO до диоксида NO₂. После этого в сажевом фильтре происходит адсорбирование дисперсных углеродных частиц, содержащихся в ОГ, и их постепенное накопление в керамической подложке блока.

После заполнения фильтра и достижения перепада давления определенной критической величины производится его регенерация, которая заключается в выжигании накопленных углеродных частиц. ЭБУ подает сигнал на установленную перед DOC-нейтрализатором форсунку, которая производит впрыскивание необходимой дозы топлива. За счет экзотермического окисления топлива в рабочих полостях DOC-нейтрализатора и керамическом блоке сажевого фильтра температура ОГ повышается до 600–800 °С, что обеспечивает выгорание частиц, накопленных в керамической каталитической подложке блока сажевого фильтра.

После сажевого фильтра в системе выпуска установлен блок SCR, предназначенный для нейтрализации оксидов азота. Для его работы требуется специальная азотсодержащая присадка, в частности водный раствор мочевины (AdBlue), которая впрыскивается в выпускную систему перед SCR-нейтрализатором. Под воздействием высокой температуры ОГ на участке термолитиза происходит распыливание, испарение и гомогенное распределение паров раствора мочевины по сечению впускного тракта SCR-нейтрализатора и первый этап ее разложения на аммиак и изоциановую кислоту:



На гидролизном участке происходит разложение изоциановой кислоты на углекислоту и аммиак:



Изоциановая кислота и особенно аммиак — активные элементы процесса, происходящего непосредственно в SCR-нейтрализаторе, в котором содержащиеся в ОГ оксиды азота восстанавливаются до двухатомного азота и водяного пара:



Несмотря на точную дозировку впрыскивания при-садки, часть аммиака может не участвовать в реакции и попасть вместе с ОГ в окружающую среду. Чтобы не допустить такой утечки, после основного SCR-нейтрализатора устанавливается дополнительный блок доокисления аммиака (АОС).

Для согласования работы всех систем используется ЭБУ, считывающий сигналы от датчиков и выдающий управляющие сигналы. В ЭБУ заложено программное обеспечение, разработанное на основе математического моделирования рабочего цикла двигателя и термодинамических и термохимических процессов в антитоксичных системах и устройствах, расположенных в выпускной системе. 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 представленной на рис. 1 принципиальной схемы комплексной системы снижения вредных выбросов разработана расчетная схема (рис. 2). Она предназначена для описания моделирования термодинамических процессов, происходящих с теплоносителем в газовом тракте дизеля ЯМЗ-6566 на пути от воздушного фильтра до впускных клапанов, в цилиндрах двигателя и элементах, расположенных в выпускном тракте, в т.ч. системах и устройствах очистки ОГ. В приведенной на рис. 2 расчетной схеме газового тракта дизеля ЯМЗ-6566 участки трубопроводов и элементы систем и устройств заменяются моделями или экспериментальными матрицами происходящих в них термодинамических и термохимических процессов.

Задача аналитических исследований заключается в:

- предварительном определении температуры и состава ОГ как теплоносителя на выходе из двигателя на основных режимах его работы;
- поиске способов сохранения и оптимизации тепловой энергии теплоносителя на пути от двигателя к DOC-нейтрализатору, сажевому фильтру и модулю SCR-нейтрализатора за счет уменьшения теплопередачи в окружающую среду и точного управления подачей дополнительного топлива перед DOC-нейтрализатором;
- определении дозировки подачи мочевины на вход в SCR-нейтрализатор для его эффективной работы.

Естественно, что 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 конструктивных решений. С этой целью разработан компьютерный расчетно-аналитический имитационный комплекс, который включает два взаимосвязанно функционирующих блока расчетов:

1) блок расчета рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (рис. 3, а), позволяющий определять динамику изменения температуры рабочего тела (теплоносителя) на выходе из рабочего пространства двигателя с учетом отвода теплоты в непрогретые стенки камеры сгорания;

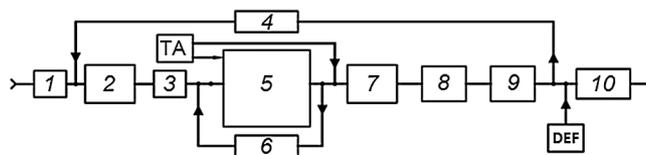


Рис. 2. Расчетная схема газового тракта дизеля ЯМЗ-6566:

1 — воздушный фильтр; 2 — компрессор ТКР; 3 — ТОНВ; 4 — СРОГ НД; 5 — ДВС; 6 — СРОГ ВД; 7 — турбина ТКР; 8 — DOC-нейтрализатор; 9 — сажевый фильтр; 10 — блок SCR; ТА — топливная аппаратура; DEF — модуль подачи раствора мочевины

2) блок расчета выпускной системы ДВС (рис. 3, б), позволяющий определять характер изменения температурно-энергетического потенциала ОГ как греющего теплоносителя в элементах выпускного тракта с учетом интенсивности отвода теплоты через стенки всех элементов в окружающую среду и выделения/поглощения тепла в результате протекания реакций в элементах очистки ОГ.

Это позволяет при разработке конструкции системы выпуска дизельного двигателя предварительно определить габаритные размеры и расположение элементов системы нейтрализации ОГ и оптимизировать эффективность их работы при сертификационных испытаниях дизеля в соответствии с принятыми регламентом Правил ЕЭК ООН № 49.05 и 49.06 циклами испытаний.

Методика позволяет получить исходные данные, которые должны быть введены на вход второго модуля расчета. С другой стороны, при достаточной базе экспериментальных исследований дизеля ЯМЗ-6566 можно воспользоваться их данными для прямого ввода в программу второго модуля расчета.

В НАМИ разработано и используется несколько методов моделирования и расчета рабочего цикла дизельного двигателя. В методике В. Ф. Звонова, А. В. Козлова и А. С. Теренченко за основу взята многозонная математическая модель сгорания рабочего заряда смеси [7]. Методика В. М. Фомина и В. Ф. Каменева рассматривает термодинамические и термохимические процессы с учетом принципов газообмена за счет внутренней рециркуляции ОГ и тесно связана с термодинамическими изменениями рабочего тела как теплоносителя в системе выпуска [5, 6].

Изменение температуры T_w тепловоспринимающей поверхности камеры сгорания на разных режимах работы ДВС, в т.ч. в периоды прогрева, работы на режиме холостого хода и последующего перехода на режимы малых нагрузок, оценивалось на основе совместного рассмотрения уравнений теплоотдачи Ньютона и теплопроводности Фурье для суммарной плотности q_z теплового потока.

Один из наиболее важных вопросов в теории теплообмена — определение коэффициента теплоотдачи α_w от рабочего тела к поверхностям теплообмена. В данной методике для определения текущего коэффициента теплоотдачи использовалась зависимость проф. Р. З. Кавтарадзе, которая была получена автором с учетом особенностей тепловыделения (закона выгорания топлива) и закономерностей, характерных для нестационарной задачи [8].

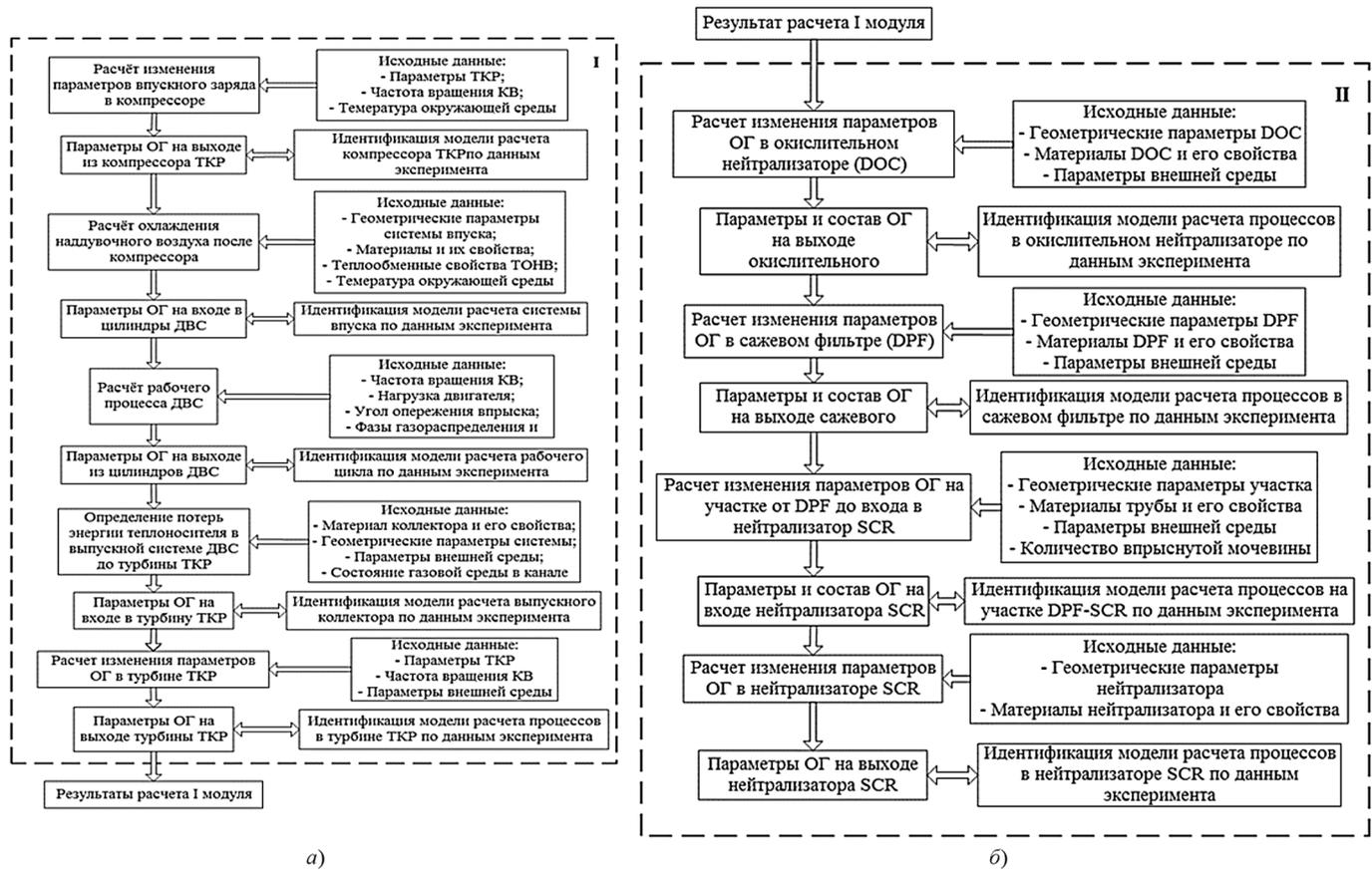


Рис. 3. Схема логической последовательности расчета параметров теплоносителя на входе в выпускную систему двигателя (а) и в элементах выпускной системы (б)

Однако для решения задач по первому блоку расчета дизеля ЯМЗ-6566 и получения необходимых данных для расчета по второму блоку оптимальна модернизированная методика расчета дизельного двигателя с учетом современных систем турбонаддува и рециркуляции ОГ, разработанная в НАМИ на основе метода Гриневецкого—Мазинга [2]. Она была применена при выполнении проектов по модернизации дизеля ЯМЗ-6566 и его систем и хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований. 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. Это позволяет сформировать математическую модель рабочего цикла в общепринятом представлении в виде подмоделей процессов газообмена (выпуска, продувки и впуска), сжатия, сгорания-расширения.

Применяемая в принятой методике расчета рабочего цикла дизеля процедура последовательного пошагового моделирования предполагает, что расчет начинается с момента начала открытия выпускного клапана, для которого ориентировочно задают температуру и давление газа. Полученные параметры рабочего тела в цилиндре в конце процесса газообмена служат исходными данными для расчета процессов сжатия, сгорания, расширения, а параметры рабочего тела в конце данного расчета —

исходными данными для расчета газообмена. Процедура расчетного цикла считается завершенной, когда абсолютная величина давления в точке *b* (момент открытия выпускного клапана), подсчитанная на предыдущем и последующем шагах, окажется меньше заданной погрешности (1 %).

Второй блок расчета (см. рис. 3, б) позволяет определять характер изменения температурно-энергетического потенциала ОГ как греющего теплоносителя в элементах выпускного тракта. Он формировался на основе принципиальной схемы (см. рис. 1) и схемы для математического моделирования (см. рис. 2). При этом для упрощения расчета DOC-нейтрализатор был скомпонован с сажевым фильтром в одном корпусе (далее фильтр-нейтрализатор). Это не должно принципиально отразиться на точности расчета, так как реакторная полость обоих устройств формируется на базе одного материала каталитического блока (кордиерита) с практически одинаковыми характеристиками теплопроводности, что может быть проверено в процессе локального термометрирования этого сборного устройства при экспериментальных исследованиях.

Температура ОГ на входе $T_{вхОГ}$ в значительной степени определяет интенсивность подвода тепловой энергии к активной зоне реакторов фильтра-нейтрализатора. Она определяет эффективность (полноту) процессов экзотермического окисления присадки дополнительного топлива и продуктов неполного сгорания CO и CH в

блоке нейтрализатора и дожигания углеродных дисперсных частиц, накапливаемых 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 [4]:

$$Q_{\text{внос}} + Q_{\text{ОГ}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{унос}} + Q_{\text{пот}} = 0.$$

Рассмотрим все слагаемые баланса. Вносимая с реагентами на вход комплекса фильтра-нейтрализатора тепловая мощность $Q_{\text{внос}}$ складывается из суммы произведений полных энтальпий реагентов при температуре входа в реактор на их индивидуальную расход:

$$Q_{\text{внос}} = \sum L_i I_i,$$

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, передаваемая в рабочую полость комплекса реакторов нейтрализатора и фильтра-накопителя от греющего теплоносителя (ОГ), определяется уравнением:

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

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

Тепловая мощность ОГ в основном зависит от их средней теплоемкости и температуры, а диапазон рабочих температур нейтрализатора составляет 300—800 °С. Перечисленные параметры ОГ 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, и одновременно с этим меняются теплофизические свойства компонентов газовой смеси, что необходимо учитывать при определении средних по составу значений этих параметров (средней теплоемкости, плотности, теплопроводности и показателей вязкости продуктов сгорания). Тепловой эффект химической реакции определяется как произведение теплового эффекта реакции одного моля реагента на его расход:

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

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

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

При экзотермическом характере реакций окисления продуктов неполного сгорания оксидов углерода и углеводородов $Q > 0$, как и при подводе на вход комплекса дополнительного топлива. Это повысит температуру ОГ

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, проходящей через каталитический блок ДОС-нейтрализатора, 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 ОГ оксидов азота.

Уносимая из реакторов с ОГ тепловая мощность, которая вычисляется аналогично $Q_{\text{внос}}$, берется со знаком "—":

$$Q_{\text{унос}} = \sum L_j I_j,$$

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 "—". Она вычисляется индивидуально для всего комплекса реакторов и представляет собой функцию средней температуры внешней стенки корпуса фильтра-нейтрализатора:

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

Потери теплоты в окружающую среду следует учитывать через стенки комплекса фильтра-нейтрализатора и при течении ОГ 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.

В реакционную камеру комплекса фильтра-нейтрализатора с ОГ поступают CO, CH, NO_x, H₂O, N₂, CO₂, O₂, а на выходе из него в основной массе содержатся H₂O, N₂, CO₂, NO_x и относительно безвредные ненормируемые реагенты. Действительные значения вносимой и уносимой тепловых мощностей определяются расходами этих реагентов.

Термодинамический расчет SCR-нейтрализатора методически аналогичен расчету фильтра-нейтрализатора. SCR-нейтрализатор, как отмечено выше, обеспечивает восстановление NO_x до нейтральных молекул азота N₂ аммиаком и частично изоциановой кислотой, получаемыми в выпускном патрубке на входе в него путем термического разложения раствора мочевины. Количество мочевины, подаваемой на его вход, должно быть точно дозировано в зависимости от режима работы двигателя. При этом необходимо определить место впрыска мочевины и длину участка до входа в реакторную полость комплекса, на котором должны полностью завершиться две стадии процесса получения и распределения аммиака по сечению патрубка для равномерного его распределения по активной поверхности пористой подложки каталитического блока, в которой накапливаются оксиды азота. Распыливание, испарение и гомогенное распределение паров мочевины в потоке ОГ — эндотермический процесс, который снижает их температуру на участке термолиза.

Последующее разложение мочевины на участке гидролиза также происходит с эндотермическим эффектом. Поэтому на этих участках температура ОГ в реакторной полости SCR-нейтрализатора не должна опускаться ниже 600 °С. Если не соблюдать это условие, возможен просок через SCR-нейтрализатор непрореагировавшего аммиака и выброс этого ядовитого вещества в окружающую среду. С целью предотвращения такого выброса на выходе SCR-нейтрализатора устанавливается каталитический блок для доокисления остатков непрореагировавшего аммиака. 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 ТКР к фильтру-нейтрализатору и на втором участке трубопровода к SCR-нейтрализатору для окончательного восстановления оксидов азота до нейтральных молекул N₂.

С учетом того, что целевая задача расчетного исследования заключается в определении осредненной за период выпуска температуры ОГ в выпускном трубопроводе, расчет соединительных участков можно проводить с использованием упрощенной методики, позволяющей достаточно достоверно определить усредненную величину данного параметра. Методика таких расчетов, разработанная В. М. Фоминым и В. Ф. Каменевым с использованием известных положений закона сохранения энергии для открытой термодинамической системы, изложена в работах [5, 6].

Таким образом, зная параметры ОГ на входе в первый участок выпускной трубы, можно определить температуру в его выходном сечении, т. е. на входе в комплекс фильтра-нейтрализатора. Аналогично рассчитывается и следующий соединительный участок до SCR-нейтрализатора.

Для проведения расчетно-теоретических исследований на базе рассмотренных выше методик написана программа и алгоритмы расчета параметров рабочего тела в цилиндре двигателя и выпускном канале на ПЭВМ. Для разработки, отладки и правильного функционирования программа разбита на самостоятельные части (подпрограммы) — программные модули, представленные на рис. 3, а, б. Это позволило написать и отладить отдельные программные модули, не заботясь об остальных частях программного комплекса, что упростило расчет. При этом исполняемые программные модули могут загружаться в оперативную память ПЭВМ и выгружаться из нее в соответствии с логикой вычислительного процесса, не загромождая ее тогда, когда они не нужны. В памяти ПЭВМ на протяжении всего времени работы программы обязан присутствовать только один модуль — управляющий. Назначение остальных модулей диктуется логикой построения программы. Среди них обязательны модули ввода и вывода информации, а также модули, реализующие математические модели соответствующих процессов. Поскольку математическое моделирование исследуемых процессов сводится в основном к решению систем дифференциальных уравнений, в состав программных модулей входит отдельный модуль, реализующий процедуры решения таких уравнений.

Процедура вычислительного процесса традиционна и имеет следующий вид. Загружается и активизируется управляющий модуль. Он загружает модуль ввода и обработки входной информации и выгружает его из оперативной памяти после окончания его работы. В соответствии с логикой построения модели управляющий модуль загружает в оперативную память программный модуль, содержащий математическую модель соответствующего процесса (процессы рабочего цикла ДВС, теплообмена и т. д.). Каждый из указанных модулей вызывает модуль решения системы дифференциальных уравнений, который работает до тех пор, пока не будет выполнен критерий окончания работы вызвавшего его модуля. После этого управление передается управляющему модулю, который сохраняет результаты вычислений и вызывает следующий функциональный модуль. После окончания процесса расчета, который распознается по специальному критерию, управляющий модуль вызывает модули, осуществляющие окончательную обработку результатов. Проверка достоверности и точности комплексной расчетной методики проводилась экспериментально путем термометрирования.

Разработанные методики позволяют оптимизировать количество теплоты для обеспечения протекания реакций конверсии вредных компонентов ОГ, а значит, необходимые для расчета параметры теплообмена между внешним источником теплоты и реакторными камерами для выбранных конструкций фильтра-нейтрализатора и SCR-нейтрализатора. При известном значении теплоты, вносимой ОГ, методики позволяют уточнить конструкционные параметры этих комплексов, в частности каталитических блоков, и состав выбранного катализатора.

Литература и источники

1. Тер-Мкртчян Г. Г., Старков Е. Е. Тенденции развития аккумуляторных топливных систем крупных дизелей // Труды НАМИ. — 2014, вып. 255.
2. Якунин Р. В. Влияние степени рециркуляции выпускных/отработавших газов на термодинамические характеристики рабочего цикла дизельного двигателя // Труды НАМИ. — 2014, вып. 255.
3. Каменев В. Ф. и др. Расчеты рабочих циклов поршневого и комбинированного двигателей внутреннего сгорания. — М.: Изд-во МГТУ "МАМИ", 2006.
4. Каменев В. Ф. и др. Математическая модель и программа инженерного расчета каталитического нейтрализатора // Автомобили и двигатели: Сб. науч. тр. — М.: НАМИ, 2005. — Вып. 233.
5. Фомин В. М. Водородная энергетика автомобильного транспорта. — М.: Изд-во РУДН, 2006.
6. Каменев В. Ф., Щеглов П. А. Улучшение энергетических и экологических характеристик дизеля с комплексной системой снижения вредных выбросов путем использования активирующей присадки водородосодержащего компонента // Труды НАМИ. — 2014, вып. 259.
7. Звонов В. А. и др. Методика расчета рабочего процесса и образования оксидов азота в цилиндре дизеля с неразделенной камерой сгорания // Труды НАМИ. — 1999, вып. 224.
8. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.