ОТЗЫВ

официального оппонента Кульчицкого Алексея Рэмовича
на диссертацию **НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамовича** «НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.04.02. – Тепловые двигатели

Актуальность диссертационных исследований по избранной теме

Диссертационная работа Надарейшвили Гиви Гурамовича посвящена актуальным для науки и практики вопросам сокращения загрязнения окружающей среды выбросами вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов

Полученные автором научные положения и результаты, выносимые на защиту, являются оригинальными.

К результатам работы, обладающим научной новизной, относится следующее:

– сформулированы основные теоретические положения для метода комплексной разработки СПООГ на базе оригинальной критериальной математической модели процессов в безразмерных переменных в каталитическом блоке СПООГ;

– на базе математической модели разработаны методические основы экспериментальных исследований СПООГ;

– исследована математическая модель разработанным инженерным методом и определены значения предэкспоненциального множителя и энергии активации на примере реакции окисления углеводородов и соответствующие коэффициенты старения, параметры каталитических блоков для гидравлического и акустического расчета на основе методики определения характеристик каталитических блоков для ПСООГ;

– получены зависимости для математической модели значений расхода топлива при регенерации сажевых фильтров, исследовано совместное применение окислительного катализатора DOC и фильтров твердых частиц;

– экспериментально исследованы характеристики математической модели системы селективного восстановления оксидов азота, обеспечивающих получение высокой степени конверсии, разработаны методики поддержания температуры катализатора;

– апробирован и верифицирован метод комплексного проектирования на базе математической модели, учитывающий диффузионные, тепловые, гидравлические, аэродинамические, акустические параметры на примере построения схемы СПООГ с высокой эффективностью.

Обоснованность и достоверность научных положений, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяются:

- использованием фундаментальных законов термодинамики, аэродинамики, тепло- и массообмена и химической кинетики, соответствующих этим законам уравнений и граничных условий, современных аналитических и численных методов реализации математических моделей, хорошо апробированных программных продуктов;

- применением при моделировании классических подходов;

- употреблением при обосновании разработанных математических моделей опытных данных в качестве граничных и начальных условий;

- сравнением с достоверными результатами исследований, выполненных в ФГУП НАМИ, фирмах BASF, Corning, Экоальянс и других;

- экспериментальным подтверждением адекватности разработанных математических моделей.

Практическая значимость результатов диссертации определяется:

- разработкой теоретических положений и осуществление на их базе комплекса мероприятий, формирующих связь безразмерной обобщенной модели с конкретными параметрами двигателя;

- созданием метода расчета, позволяющего реализовать математические модели и с достаточной для практики точностью формализовать решение задачи проектирования, доводки и модернизации как серийных, так и перспективных СПООГ и их конструкции;

- решением ряда теоретических, методологических и экспериментальных вопросов исследования процесса кинетики и экологических характеристик, позволяющих сократить сроки выполнения и материальные затраты на проектирование, испытание и калибровку СПООГ.

Оценка структуры, содержания диссертации и завершенности работы в целом

Диссертационная работа включает введение, 7 глав, общие выводы, список литературы. Работа содержит 467 страниц, в том числе 312 рисунков, 67 таблиц, документы, отражающие уровень практического использования результатов исследований - акты внедрения результатов диссертационной работы: на ПАО «КамАЗ» (г. Набережные Челны), ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва), ФГУП «НАМИ» (г. Москва), ООО «УАЗ»

(г. Ульяновск), ООО «Экоальянс» (г. Новоуральск, Сведловская обл.), ПАО «Автодизель» (г. Ярославль). Список литературы включает 299 наименований, в том числе 228 - на иностранных языках.

Во Введении (10 стр.) дана общая характеристика работы; отражены её актуальность, научная новизна, методология и методы исследования, достоверность и обоснованность полученных результатов, положения, выносимые на защиту, практическая значимость и реализация результатов работы; также приведены сведения о публикациях, структуре и объёме работы. В этом разделе кратко охарактеризованы проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды от передвижных источников, в том числе – с созданием комплексных систем последующей обработки отработавших газов (СПООГ или СООГ). Отмечено, что создание научных основ комплекса методик разработки систем последующей обработки отработавших газов, обеспечивающих современные экологические показатели двигателей внутреннего сгорания, является актуальной задачей как самостоятельная научная проблема, так и прикладная задача государственного значения в Российской Федерации. На основании чего диссертантом сформулирована цель работы: создание комплексной методики поиска технических решений и выбора рациональных путей разработки СООГ, учитывающих вопросы акустики, химической кинетики, термодинамики и теплообмена, массо- и газообмена и аэродинамики для обеспечения экологической и акустической эффективности ДВС. Здесь же определены и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. При этом основное требование к задачам – это комплексность и универсальность:

1. Сформировать и исследовать поведение обобщенной (безразмерной) математической модели каталитического блока, связывающей основные параметры различных процессов с параметрами ДВС.

2. Разработать научно-методические основы комплексных экспериментальных исследований общих и частных механизмов химической кинетики, термодинамики и теплообмена, массо- и газообмена, акустики, аэродинамики различных функциональных СООГ ДВС.

3. Исследовать функциональные особенности процессов в блоках с учетом кинетики гетерогенного катализа на основе критериальной математической модели.

4. Развить методологический подход комплексного проектирования СООГ на основе критериальной математической модели для применения в ДВС с высокими экологическими показателями.

В первой главе «Анализ проблем снижения токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания» (64 стр.) представлены материалы,

касающиеся состояния рассматриваемого вопроса. В этом разделе рассмотрены проблемы общего загрязнения окружающей среды как в России, так и за рубежом, вопросы нормирования содержания вредных веществ в атмосфере и в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС), методы снижения токсичности ДВС. Основное внимание было уделено системам нейтрализации вредных веществ, применяемым на транспортных средствах: их конструкции, методам проектирования и расчёта, согласованию требований экологической и акустической эффективности, надежности.

Показано, что разработка метода комплексного расчета сопряжена с необходимостью обобщения результатов предыдущих исследований и разработок, создания новых подходов, решение которой является самостоятельной актуальной крупной научно-технической проблемой, отличающейся новизной.

Вторая глава «Разработка математических моделей СПООГ» (82 стр.) посвящена аналитическим исследованиям процессов, протекающим в каталитическом блоке системы последующей обработки отработавших газов (СПООГ). В этом разделе приведено описание общих закономерностей процессов, протекающих в каталитическом блоке, математическое описание процессов, протекающих в канале каталитического блока, проведён анализ указанных математических моделей. Также дано достаточно подробное изложение математических моделей окислительного блока нейтрализатора, сажевого фильтра, SCR-нейтрализатора (реализующего процесс жидкостной нейтрализации оксидов азота), накопительного LNT-нейтрализатора, проведено расчётное моделирование температурных и скоростных параметров потока отработавших газов (ОГ) в блоках нейтрализатора. В результате исследований:

– разработаны теоретические основы для метода комплексного проектирования СПООГ на базе оригинальной обобщающей математической модели процессов в канале каталитического блока СПООГ, учитывающей начальный участок течения и массообмена;

– разработан метод анализа оригинальной обобщающей математической модели процессов в канале каталитического блока в безразмерной форме, проанализирована система безразмерных критериев Sh, Fo, Re, Da, Bo, Eu в связи с параметрами двигателя;

– разработаны и верифицированы математические модели каталитических блоков, процессов окисления и восстановления при катализе на основе математического описания процессов газодинамики, теплообмена и химической кинетики в элементах СПООГ, заданы начальные и граничные условия;

– проведен расчет по математическим моделям с учетом каталитической активности при различных входных данных по токсичности, расходу и температуре ОГ и анализ влияния входных параметров на выходные характеристики, что дает возможность калибровки СПООГ.

В третьей главе «Проведение испытаний СПООГ и создание экспериментальных установок» (60 стр.) приведено подробное описание экспериментальных установок (8 типов экспериментальных установок для исследования различных типов двигателей с различными вариантами СПООГ): установки для исследований селективного восстановления оксидов азота на базе дизеля ЯМЗ-6566 (производства «Ярославский моторный завод-Автодизель»), установки для исследования прототипов серийных глушителей-нейтрализаторов для исследований селективного восстановления оксидов азота, установки для испытаний активной регенерации сажевого фильтра DPF с дизельным двигателем Д245.9 (производства ПАО «Минский моторный завод», Белоруссия) и окислительным нейтрализатором в составе с дизельным двигателем 4Т371 (производства ООО «ЧТЗ-Уралтрак»). Также приведены результаты исследования установки для проведения испытаний на одноцилиндровом двигателе большого объема СПООГ SCR, DOC + DPF с системой активной регенерации, установки для проведения исследований СПООГ с LNT-нейтрализатором, установки для проведения испытаний трехкомпонентного нейтрализатора газового двигателя и установка для проведения испытаний трехкомпонентного нейтрализатора высокофорсированного двигателя.

Дано описание разработанных программ испытаний, показана возможность получения результатов по экологической безопасности различных систем и условий их применения в экспериментальных установках и серийных двигателях. На основе обобщения результатов получены конкретные результаты:

– обосновано применение датчиков оксида азота в качестве датчиков аммиака для контроля и калибровки системы; определены значения порогового давления для регенерации;

– создан проект модульной установки различного типа (накопительной, окислительной, окислительно-восстановительной и фильтрующей) с рациональным расположением датчиков и форсунок в трактах отвода ОГ для получения равномерного распределения компонента по сечению;

– единая методика комплексных испытаний системы нейтрализации дополнена методикой калибровок блоков управления СПООГ.

В главе 4 «Исследования каталитического покрытия блоков. Основы разработки и испытаний» (30 стр.) представлены разработанные материалы, касающиеся исследования конструкции каталитических блоков: методика по

выбору конструкции каталитических блоков и их лабораторных испытаний; методика старения, позволяющая разработать требования по надежности каталитических блоков, соответствующие ресурсным испытаниям; методика расчета кинетики процесса, необходимых для расчета скорости реакций, определены коэффициенты старения; получен коэффициент увеличения концентрации CO для корреляции значений параметров кислородной ёмкости (OSC – Oxygen Storage Capacity). Предложена методика-порядок разработки/выбора блоков-носителей и каталитического слоя для необходимой корреляции геометрических параметров и химического состава. Проведен анализ параметров керамических субстратов для каталитических блоков. Показаны основные критерии выбора материала-носителя. Также рассмотрены испытания, проводимые при разработке блоков. Установлена процедура определения и оценки химического состава и основных параметров, влияющих на работоспособность каталитической системы обработки отработавших газов. Также проведено исследование такого параметр каталитического блока как кислородная емкость OSC, и ее влияние на эффективность блока. Установлена корреляция для двух методов контроля OSC. Кроме того, разработана процедура старения каталитических блоков с подтверждением эффективности.

В пятой главе «Исследование функциональных возможностей СПООГ различного назначения» (58 стр.) представлены результаты оценки функциональных возможностей элементов фильтрации систем нейтрализации, результаты как стендовых испытаний двигателей с различными вариантами систем нейтрализации, так и ходовых испытаний. Проведены испытания штатной и разработанных образцов систем нейтрализации. Установлено, что штатная система нейтрализатора обеспечивает очистку оксидов азота на уровне 60–70%. Испытания показали, что при внесении определенных изменений в конструкцию системы (оптимизация размещения форсунки подачи раствора мочевины, установка завихрителя газового потока, уменьшение потерьтепла), а также при настройке подсистемы подачи реагента-восстановителя уровень эмиссии NO_x может быть уменьшен более чем на 95%; в сочетании с внесенными изменениями и при использовании отдельного окислительного нейтрализатора возможно увеличить эффективность очистки до 97% и снизить выбросы NO_x до значений, отвечающих требованиям Евро-6 (менее 0,4 г/кВтч). Показано, что наиболее надежными и эффективными системами обезвреживания токсичных компонентов дизеля являются комбинированные системы, сочетающие фильтрующие элементы и системы нейтрализации ок-

сидов азота с преобладанием систем селективного каталитического восстановления и адсорбционного — каталитические системы типа LNT (Lean NO_x Traps).

Представлены также данные о функционировании системы регенерации сажевого фильтра, процесса фильтрации дисперсных частиц в ходе испытаний как на одноцилиндровом двигателе, так и полноразмерном двигателе. Исследованы значения характеристик DOC для возможности применения в качестве снижения эмиссии дисперсных частиц. Показана невозможность использования DOC без фильтра на реальном двигателе. Проведены сравнения противодавлений различных фильтров дисперсных частиц. Исследован процесс изменения температур на DOC в реальной системе регенерации. Получены значения изменения эффективности фильтрующего элемента до и после регенерации. Отработаны алгоритмы управления подсистемой подачи топлива для регенерации дизельного фильтра и показано, что впрыскивание топлива в выпускной тракт перед окислительным нейтрализатором не приводит к дополнительной эмиссии углеводородов в процессе термической регенерации.

В шестой главе «Акустическая эффективность глушителей –нейтрализаторов» (50 стр.) изложен материал по методам расчета акустических параметров глушителя-нейтрализатора, экспериментальному определению акустических параметров элементов системы выпуска, расчёте акустических характеристик блока каталитического нейтрализатора и всей системы нейтрализации.

Показано, что разработанная система нейтрализации, состоящая из набора каталитических блоков, обладает достаточной акустической эффективностью в высокочастотном диапазоне выше 1500 Гц, недостаточной акустической эффективностью в среднечастотном диапазоне 500–1500 Гц и крайне низкой эффективностью в низкочастотном диапазоне до 500 Гц. Для устранения выявленных недостатков предложено применить дополнительный элемент (глушитель), повышающий акустическую эффективность системы выпуска в низко- и среднечастотном диапазонах. Проведенная оценка показала, что без применения дополнительного объема акустическая эффективность системы каталитических блоков недостаточна. В ограниченных габаритах для повышения акустической эффективности до приемлемого уровня достаточно применение двухкамерного глушителя-нейтрализатора с диссипативной набивкой в одной из камер.

Результаты исследований показали возможность создание эффективной конструкции глушителя-нейтрализатора, объединенного в одном корпусе с каталитическими блоками.

В седьмой главе «Применение комплексного метода для проектирования СПООГ» (64 стр.) изложены подходы к построению схем систем нейтрализации, выбору комплектующих элементов и материалов, созданию прототипа СПООГ. Также приведены результаты обоснования степени форсирования, изложена инженерная методика расчета и оптимизации параметров СПООГ, представлены алгоритмы проведения расчётов эффективности каталитических блоков, дано описание оптимизации конструкции СПООГ, в том числе с учётом параметров глушителя-нейтрализатора, температурных полей глушителей-нейтрализаторов, противодавления СПООГ, представлены данные по оценке шумоглушения СПООГ.

В этом разделе продемонстрированы предварительные подходы к построению схемы СПООГ (выбор технологий) и проведена оценка вариантов построения СПООГ на основе общих принципов построения систем. Также проведена оптимизация проектируемого СПООГ по параметрам противодавления, температуры и акустическим параметрам.

По результатам исследований определены диапазон параметров исходных данных для расчета и характеристик каталитических блоков, а также определен диапазон безразмерных параметров и критериев. Кроме того, разработана методика определения эффективности каталитических блоков и верифицирован метод комплексного проектирования на основе безразмерной математической модели с учетом диффузионных, тепловых, гидравлических и акустических характеристик построения схем СПООГ с эффективностью до 96,9%.

В Заключении (3 стр.) сформулированы основные выводы по работе в целом.

Соответствие направления и темы диссертационных исследований пунктам паспорта научной специальности

Диссертация НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамовича «Научные основы создания комплексных систем обеспечения современных экологических и акустических показателей двигателей внутреннего сгорания» соответствует паспорту специальности 05.04.02. – Тепловые двигатели, а именно пунктам:

1. Теоретические и экспериментальные исследования тепловых, газодинамических, гидродинамических, механических и физико-химических процессов в двигателях и их системах.

2. Теоретические и экспериментальные исследования по обеспечению экономичности и экологической чистоты рабочих процессов в тепловых двигателях, созданию надежных конструкций двигателей и их агрегатов.

Замечания и вопросы по работе

1. В Главе 4 «Исследования каталитического покрытия блоков. Основы разработки и испытаний», рассматривая вопрос повышения эффективности катализаторов, автор, в частности, рассматривал углеводороды, находящихся в отработавших газах, как сумму всех имеющихся углеводородов. Соответственно, не был рассмотрен такой вопрос как учет группового разнообразия углеводородов, т.е. оценка преобладающего содержания в суммарных углеводородах отдельных групп углеводородов, отличающихся по углеродному числу. В тоже время, оценка влияния вида топлива, скоростного и нагрузочного режимов, составляющих испытательный цикл, позволяет обеспечить селективный подбор материала катализатора, и соответственно повысить эффективность системы последующей обработки отработавших газов (СПООГ). В диссертационной работе этот фактор не отражён.
2. При окончательной оценке эффективности конверсии синтезированных конструкций систем последующей обработки отработавших газов (СПООГ) для газодизельного двигателя (стр.425, табл.7.12 и 7.13, рис.7.35) отсутствуют данные по эмиссии дисперсных частиц.
3. Автор, рассматривая «Схему основных влияющих параметров рабочего процесса» и отмечая, что «Выбранная стратегия настройки параметров приводит к одной из базовых моделей структуры токсичности отработавших газов…» (стр.84, последний абзац), в одну группу с вредными веществами (суммарными углеводородами СН, оксидом углерода СО и оксидами азота NO_x) включил нетоксичное вещество - диоксид углерода CO_2, но не включил дисперсные частицы (стр.85, первый абзац).
4. Название п.7.7 в Оглавлении (стр.8) и по тексту диссертации (стр. 423) отличаются: в первом случае это: «Валидация комплексного метода проектирования СПООГ», а во втором: «Верификация комплексного метода проектирования СПООГ». Поскольку понятия «валидация» и «верификация» различны, то необходимо уточнение.
5. По тексту диссертации в отношении одного и того же вещества используются два термина (и два обозначения): дисперсные частицы (PM, TPM) и твердые частицы (ТЧ), хотя в разделе «Обозначения и сокращения» (стр.10) приведено одно обозначение: «TPM (PM)». Например, обозначение ТЧ указано на стр.11, стр.47, стр.60, стр.144, стр.261, стр.311…; а обозначение «PM или TPM» используется на стр.27, стр.28, стр.32, стр.64, стр.171, стр.201, стр.267, стр.271…

Согласно определению (данному, например, в Правилах ЕЭК ООН №96): вредные частицы - «это вещества, оседающие на фильтре после пропускания через него смеси отработавших газов и воздуха при температуре не выше 52 °С». Соответственно на фильтре оседают не только твердые, но и жидкие вещества - сконденсированные углеводороды (вода в расчет не принимается, поскольку методически исключается из расчетов). Таким образом, понятия «дисперсные частицы» и «твердые частицы» принципиально различны.

6. В третьей Главе «Проведение испытаний СПООГ и создание экспериментальных установок» упоминается об оценке механических свойств и определении температурных границ для оценки надежности каталитических блоков (стр. 226, 4-й абзац). Но ранее необходимость этих исследований нигде это не отмечалась, в том числе в цели и задачах исследования (стр.15).
7. Почти во всех Главах присутствует обзорный материал в дополнение к Главе 1. Например, в п.2.3 «Применение математической модели в расчетах различных типов каталитических блоков» (стр.131-133) дан поясняющий материал о применении вычислительной техники; в п.4.1. «Начальный этап разработки каталитических блоков нейтрализаторов» (стр. 230-233) также слишком подробно излагается соответствующий материал (в том числе – табл.4.1 «Характеристики керамических материалов»); в п.5.1.1 «Функциональные возможности фильтров» (стр. 256-258) также приведен соответствующий обзорный материал; выводы по Главе 5 изложены непосредственно на стр.313, но перед ними на двух страницах (стр.311-312 и частично – на стр.313) дан краткий обзор по данному вопросу…. Всё это привело к излишнему увеличению объема диссертации.

Однако указанные замечания не затрагивают принципиальных положений диссертации, достоверность выводов и научной новизны, и не снижают общего положительного впечатления от работы.

Соответствие содержания диссертации и автореферата

Название диссертации соответствует её содержанию. Оформление работы соответствует требованиям ВАК РФ.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамовича «Научные основы создания комплексных систем обеспечения современных экологических и акустических показателей двигателей внутреннего сгорания» является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, выполненной автором самостоятельно на высоком уровне, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны. Защищаемые соискателем научные положения отличаются научной новизной и практической значимостью; достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Задачи, поставленные в работе, решены в полном объёме. Текст автореферата соответствует структуре и содержанию диссертации. В научных трудах по теме диссертации в полной мере отражены суть и содержание проведённых исследований.

Диссертация НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамовича «Научные основы создания комплексных систем обеспечения современных экологических и акустических показателей двигателей внутреннего сгорания» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели, а её автор - **НАДАРЕЙШВИЛИ Гиви Гурамович** - заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели.

Официальный оппонент,
доктор технических наук по специальности 05.04.02., доцент, старший научный сотрудник,
Заслуженный машиностроитель РФ,
специалист по сертификации АО «Камешковский механический завод» А.Р. Кульчицкий

Почтовый адрес:
АО «Камешковский механический завод»,
601300, Владимирская область, г. Камешково, ул. Дорожная, 14.
Тел. (49248) 2-13-46, Email: kamzpri@mail.ru
Тел. 8(905) 612-43-54, ark6975@mail.ru

Подпись Кульчицкого А.Р. заверяю.
Начальник отдела кадров