

02.03.2021

ОТЗЫВ

официального оппонента Кавтарадзе Реваза Зурабовича о диссертационной работе Надарейшили Гиви Гурамовича «Научные основы создания комплексных систем обеспечения современных экологических и акустических показателей двигателей внутреннего сгорания», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 - «Тепловые двигатели».

Диссертация Г.Г. Надарейшили содержит 461 страницы текста, в том числе список литературы из 299 названий, из них 228 на английском языке, 312 рисунка и 67 таблиц. Работа состоит из введения, 7 глав и заключения (основных выводов).

Две глобальные проблемы современной цивилизации -энергетическая и экологическая-непосредственно связаны с поршневыми двигателями, как активными потребителями топлив нефтяного происхождения и одновременно активными загрязнителями окружающей среды. С другой стороны, высокий КПД этих двигателей, уровень совершенствования, надежность эксплуатации и всеобщее распространение исключают их полную замену альтернативными источниками энергии для транспортных средств. Очевидно, что этим определяется одно из основных направлений современного двигателестроения - по возможности максимальная декарбонизация продуктов сгорания и снижение в них концентрации оксидов азота. Обычно это достигается двумя путями: усовершенствованием рабочего процесса и последующей нейтрализацией вредных компонентов.

Несмотря на то, что современные методы экспериментального исследования и 3D-математического моделирования рабочих процессов, а также внедрение электронных систем управления двигателем позволяют минимизировать содержание вредных веществ продуктах сгорания, последовательное ужесточение экологических норм вынуждают производителей использовать и развивать системы последующей обработки отработавших газов. В связи с этим можно утверждать, что диссертационная работа Г.Г. Надарейшили, посвящённая поиску научно -технических решений с целью проектирования и

создания таких систем, установка которых на поршневой двигатель обеспечить требуемые экологические характеристики, посвящена **актуальному вопросу современного двигателестроения**.

Диссертационная работа состоит из таких основных частей, как анализ опубликованных работ по данной проблематике, математическое моделирование, экспериментальное исследование, применение полученных результатов исследования на практике, в частности, при проектировании эффективных глушителей-нейтрализаторов. Таким образом, диссертационная работа Г.Г. Надарейшвили, безусловно, является **завершенной научной работой**.

Наиболее важные, на мой взгляд, достижения автора диссертации отражены в следующих оригинальных результатах:

1. При исследовании SCR (selective catalytic reduction)-нейтрализатора, работающего по избирательному принципу, диссертант, успешно используя свойство стандартных полупроводниковых датчиков оксида азота фирмы Continental реагировать на наличие в потоке отработавших газов аммиака NH_3 , избавляется от необходимости установки специального блока регистрации аммиака, и использует вместо него тот же датчик оксида азота (см. раздел 3.1.5). Последний в данном случае является связующим звеном между методами регистрации двух различных веществ. В диссертации приведена зависимость, для оценки показания датчика оксидов азота с учетом влияния аммиака. Практическая значимость этого результата заключается в том, что на основе одного датчика можно осуществить контроль и калибровку измерительной системы.
2. Одной из проблем в теории поршневых двигателей, в частности, при исследовании химических реакций, является правильный выбор таких важных параметров химической кинетики, какими являются предэкспоненциальный множитель и энергия активации. Традиционный подход при этом сводится к выбору значений этих параметров из огромного количества существующих справочных данных, полученных при различных физико-химических условиях реакции и к последующему

экспериментальному уточнению выбранных величин. Диссертант, отказываясь от такого подхода, провел исследование эффективности дизельного окислительного катализатора DOC и каталитического сажевого фильтра CSF, определил значения предэкспоненциального множителя и энергии активации для реакции окисления углеводородов. Важно подчеркнуть, что значения указанных параметров были определены с учетом старения катализаторов, т.е. до и после старения (см. раздел 4.6).

3. Эффективность действия исследуемых фильтров твердых частиц для дизелей ЯМЗ в диссертации оценивается как способностью адсорбции сажи, так и способностью ее окисления при повышении температуры. Повышение температуры на входе в фильтр достигается путем впрыскивания топлива в дизельный окислительный катализатор (DOC), при этом определены значения расхода топлива, необходимые для обеспечения температуры 650–750°C – нужной для регенерации сажевого фильтра. Диссертантом получено соотношение для производительности топливного насоса в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и давления на фильтре, удобное и нужное для моделирования процессов в дизельном окислительном катализаторе. Экспериментальная проверка эффективности оптимизированного сажевого фильтра, проведенная измерениями дымности перед срабатыванием системы регенерации и после очистки фильтра, показала снижение дымности до 0,03 единиц по шкале Bosch.

Необходимо отметить, что полученные Г.Г. Надарейшвили результаты, изложенные выше в п.п. 1, 2 и 3, относятся к наиболее оригинальной части диссертационной работы и их следует рассматривать, как **научную новизну** в области теории поршневых двигателей и их систем.

4. Преобладающая часть диссертационной работы посвящена испытаниям двигателей и экспериментальным исследованиям системы последующей обработки отработавших газов, разработке и реализации методов их проектирования, а также анализу акустической эффективности глушителей-нейтрализаторов. Диссертационная работа Г.Г. Надарейшвили **выгодно**

отличается от работ данного направления, выполненных и защищенных за последние 10-15 лет, прежде всего, обширным экспериментальным материалом, изложенным в главах 3-7. Здесь следует интересные, не только с научной, но и с практической точки зрения, результаты исследования:

- двигателей с разными вариантами систем последующей обработки отработавших газов (глава 5);
- опытного образца двигателя 4T371 с дизельным окислительным катализатором (раздел 3.4);
- системы активной регенерации и сажевого фильтра на двигателе ММЗ 245.9 (раздел 3.3):
 - трехкомпонентных нейтрализаторов газового (раздел 3.7) и высокофорсированного (раздел 3.8) двигателей;
 - разных вариантов каталитических блоков (раздели 4.4-4.6);
 - акустических параметров элементов системы выпуска, полученных на основе измерении звукового давления на входе и выходе глушителя-нейтрализатора (раздел 6.3) и др.

Отмеченные экспериментальные результаты не только являются обоснованием предпосылок, принятых автором при моделировании процессов в системах обработки отработавших газов, но и могут быть успешно применены при построении новых моделей и гипотез для доводки существующих, а также для проектирования и создания перспективных систем. Это указывает на **практическую значимость результатов** диссертационной работы Г.Г. Надарейшвили. Кроме того, перечисленные выше (см. п. 4) результаты применения разработанных систем на двигателях различного типа и размеров могут быть рассмотрены как примеры **практической реализации** результатов исследовательской работы.

Применение автором диссертации современных методов и средств экспериментальных исследований (главы 3-7), а также результаты верификации расчетных результатов путем сравнения с опытными данными, указывают на

достоверность как используемых научных положений, так и полученных на их основе вышеуказанных конкретных результатов.

По диссертационной работе Г.Г. Надарейшвили имеются следующие **замечания:**

1. Понятие «Комплексные системы обеспечения экологических показателей ДВС» подразумевает и усовершенствование акустических показателей, т.е. снижение шума, уровень которого нормируется, как и уровень содержания вредных компонентов в отработавших газах (ОГ). В связи с этим, очевидно, что диссертации можно было дать более лаконичное и точное название.
2. Большое место (более чем 80 страниц) в диссертации занимает разработка математических моделей систем обработки отработавших газов (см. главу 4). Однако в ней не оказалось места для моделирования рабочего процесса – источника возникновения вредных веществ, для снижения концентрации которых созданы все разработанные системы, т.е. увлекаясь борьбой против последствий автор забывает о причине. Параметры рабочего процесса в момент открытия выпускных органов двигателя являются начальными условиями для моделирования процессов в системах обработки ОГ. Их значения определяют в каких условиях будет работать система обработки ОГ - в тяжелых или облегченных. Включение хотя бы относительно простой, 0-мерной термодинамической модели рабочего процесса в общую схему сквозного моделирования «впускная система-двигатель-система выпуска с подсистемой обработки ОГ» позволяет установить обратную связь между объектом исследования и двигателем, еще на стадии проектирования двигателя определить какую систему с какими характерными параметрами установить на конкретном типе двигателя.
3. Порой небрежно, без должной строгости, записаны основные уравнения математической модели. В связи с этим возникают вопросы, на которых диссертант должен иметь разъяснения:

- 3.1. Исходные уравнения энергии для потока (2.12) и для массива блока (2.13) записаны неправильно. Действительно, последний член в правой части уравнении (2.12) имеет размерность Вт/м², а все остальные члены - Вт/м³. Тоже самое и с уравнением (2.13), где размерность членов в левой части м/с, а в правой части первые два члена имеют размерность Вт/м², а третий - Вт/м³. Следовательно, неправильно записано уравнение (2.84), полученное по всей вероятности из указанных уравнений, а не из уравнений Навье-Стокса и диффузии (2.14)-(2.17), как это указано автором на с. 118.
- 3.2. Что означает два знака «+» в правой части уравнения энергии (2.12)? Если это опечатка, тогда почему она неоднократно повторяется в тексте диссертации [см. уравнение (2.84)] и даже в автореферате [см. уравнение (1)]?
- 3.3. Исходную систему уравнений Навье –Стокса [уравнения (2.14)-(2.16), с.101] диссертант, как он отмечает на с. 118, «записывает в безразмерном виде, пригодном для анализа». Но и «в безразмерном виде» они [уравнения (2.84) - (2.87), в автореферате -уравнения (1)-(2)] вряд ли станут пригодными так, как не являются не уравнениями Навье – Стокса, не их усредненной формой Рейнольдса. В отличие от исходной системы в этих уравнениях отсутствует вязкость. В связи с этим невозможно понять утверждение диссертанта, что «для расчета течений применяются уравнения Навье-Стокса с замыкающими уравнениями модели турбулентности k-ε» (с. 147). Т.е., при отсутствии членов вязкости и турбулентности в уравнениях [(2.84) - (2.87), в автореферате (1)-(2)] к ним добавляется модель турбулентности? Из курсов гидродинамики известно, что уравнения Навье -Стокса не требуют замыкания, но из-за сложности их решения (даже численного!) их усредняют, после чего получается незамкнутая система Рейнольдса, которая и требует введения RANS-моделей турбулентности.

- 3.4. Исходная система уравнений (2.12) - (2.16) трехмерная, однако после преобразования автор им придает двумерный вид [(2.84) – (2.87), в автореферате - (1)-(4)], при том без должного обоснования. Если отсутствие в уравнениях переменной y означает переход к осесимметричной задаче, то осевая симметрия расчетной области, т.е. конструкций нейтрализатора (рис.2.8 и 2.33) или сажевого фильтра (рис. 2.41), конечно, не достаточна для этого. Надо еще доказать, что соответствующие граничные условия для этих конструкций тоже осесимметричные.
- 3.5. На с. 101 – 109 диссертации трижды (!) записывается одно и тоже самое уравнение диффузии Фика, при этом каждый раз автор называет его по разному: уравнением сохранения массы (2.17), с. 101; уравнением распределения концентрации i -того вещества (2.18), с. 102; уравнением переноса количества вещества (2.65), с. 109. Дальше идет текст (абзац), взятый видимо из учебного пособия, об уравнении Умова, не имеющего никакого отношения не только к уравнению диффузии, но и к тематике диссертационной работы.
4. Диссертация в целом, и особенно глава 3, перегружена подробными техническими данными испытанных двигателей, характеристиками керамических материалов (табл. 4.1) и т.п. Их следовало бы перенести в приложения. В главе 2 заметное место занимают преобразования и выводы простейших алгебраических соотношений. Кроме того, не очевидна необходимость наличия в диссертации 5 разделов [(3.1.3) - (3.4.3) и (3.7.3)], посвященных монтажу различных систем. Все это придает указанным частям диссертации вид технического отчета.
5. В ряде случаев используются неудачные термины и высказывания: «математический алгоритм» (с. 383); «критериальная математическая модель каталитического блока в виде нейтрализационной мощности» (с. 9 в автореферате); рисунки 6.37 и 6.38 названы моделями глушителя, а рис. 4.6 – исследованием термостабильности керамического блока; используемые

автором безразмерные комплексы названы совершенно произвольно то числом, то критерием, например, «число Рейнольдса» и «критерий Нуссельта» (с.119). Заметим, что в современной научной литературе принято такие термины, как, например, «критерий Нуссельта», заменить на «число Нуссельта». Также следует указать, что название «уравнения Навье-Стокса» в единственном числе не используется (с. 101).

Полагаю, что высказанные замечания, скорее всего, должны быть рассмотрены как пожелания для будущей работы диссертанта. Они не умаляют общую, весьма положительную оценку диссертационной работы Г.Г. Надарейшвили, которая прошла достаточную аprobацию, а ее содержание в полной мере отражено в автореферате и работах автора, опубликованных в рецензируемых изданиях.

Важно отметить так же, что Г.Г. Надарейшвили является известным специалистом в данной области науки, приложившим большие усилия для развития в НАМИ ведущего в РФ исследовательского направления по разработке антитоксичных систем для автомобильных поршневых двигателей.

Считаю, что диссертационная работа «Научные основы создания комплексных систем обеспечения современных экологических и акустических показателей двигателей внутреннего сгорания» содержит все необходимые компоненты докторской диссертации, она полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Надарейшвили Гиви Гурамович достоин присуждения ему ученой степени доктора технических по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели».

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Поршневые двигатели» (Э2)

МГТУ им. Н.Э. Баумана



ТЕЛ. 8-499-263-60-48

Р.З. Кавтарадзе