

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Лукшо Владислава Анатольевича
на тему: «Комплексный метод повышения энергоэффективности газовых
двигателей с высокой степенью сжатия и укороченными тактами впуска и
выпуска» по специальности 05.04.02 – Тепловые двигатели.
на соискание ученой степени доктора технических наук.

Актуальность избранной темы.

Развитие конструкций и показателей современных автотранспортных двигателей в значительной мере определяется жесткими международными требованиями по выбросам вредных веществ и снижению потребления энергоресурсов в качестве топлива. Поэтому большое внимание производители автотранспортных средств уделяют научным исследованиям по переводу двигателей на питание альтернативными источниками энергии и в частности газовыми топливами. Однако этот процесс затрудняется из-за различий физико-химических свойств традиционных топлив нефтяного происхождения и газовых видов топлив, которые оказывают влияние на КПД двигателя, а значит и его эффективные показатели по мощностным качествам, экологии и топливной экономичности. Особенно актуальна для производителей двигателей становится проблема перевода дизелей средних тяжелых транспортных средств на газовое топливо без ухудшения их технико-экономических и эксплуатационных качеств.

Вместе с тем, серийно выпускаемые газовые двигатели обладают рядом недостатков, основным из которых являются повышенный эксплуатационный расход топлива и их высокая теплонапряжённость. Последняя проблема решается в основном за счёт дефорсирования двигателя по мощности и крутящему моменту. Диссертация В. А Лукшо посвящена разработке путей достижения высоких мощностных показателей газовых двигателей в сочетании с высокой топливной

экономичностью и экологическими показателями, поэтому тема диссертационной работы Лукшо В.А. «Комплексный метод повышения энергоэффективности газовых двигателей с высокой степенью сжатия и укороченными тактами впуска и выпуска», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 – Термовые двигатели безоговорочно является актуальной.

В своей работе Лукшо В.А. исследует не только особенности рабочих процессов газовых двигателей, работающих по традиционным циклам, но и предлагает ряд теоретически обоснованных новых решений по организации термодинамического цикла и предлагает методы достижения высоких показателей.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения с общими выводами, списка литературы из 166 наименований. Тема диссертационного исследования соответствует ее содержанию. Поставленные задачи последовательно раскрываются в исследовании. Текст диссертации изложен на 365 страницах с 44 таблицами и 162 рисунками. Материалы диссертации опубликованы в 2 монографиях, 51 печатной работе, в том числе в 29 работах в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов диссертации 10 авторских свидетельствах и патентах. Две работы автора опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Область исследований автора соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.04.02 – п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования по обеспечению экономичности и экологической чистоты рабочих процессов в тепловых двигателях, созданию надежных конструкций двигателей и их агрегатов»

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Все теоретические исследования и практические рекомендации по конструкции и рабочему процессу разработанного двигателя

подтверждены большим объемом экспериментальных исследований, подтвердивших адекватность применяемых в процессе теоретических исследований математических моделей и достоверность расчетных исследований.

Эксперименты, выполненные автором, подтвердили возможность улучшения экологических показателей газовых двигателей, конвертированных из дизелей при сохранении их мощностных и экономических параметров и улучшении экологических показателей.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность основных положений, изложенных в диссертации обеспечена грамотным выбором исходных теоретических положений, их соответствием фундаментальным основам науки, корректностью и адекватностью математических моделей, подтвержденных экспериментальными данными, полученными на современном измерительном оборудовании.

Наиболее значимые положения научной новизны результатов диссертационного исследования заключаются в:

- разработке научных основ организации оптимального термодинамического цикла газового двигателя и реализации его рабочего процесса;
- формировании технологии и принципов управления газовыми двигателями с высоким наддувом;
- теоретическом и экспериментальном обосновании эффективности рабочего газового двигателя с укороченными тактами впуска и выпуска;
- разработке принципиально новых (зашитённых патентами) конструктивных решений и практике создания газовых двигателей;
- результаты комплексных расчётов и экспериментальных исследований подтверждающих возможность достижения высоких

энергетических и экономических показателей газового двигателя за счет организации рабочего процесса с укороченными тактами впуска и выпуска и высоким наддувом без изменения геометрической степени сжатия;

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Автором разработаны научные основы выбора оптимального термодинамического цикла для газового двигателя, конвертированного из дизеля, обеспечивающие современные и перспективные требования по энергоэффективности и экологическим качествам. Им на основе методов математического моделирования разработан имитационный комплекс программ для проведения расчетно-экспериментальных методов исследования рабочего процесса газового двигателя с принудительным воспламенением рабочего заряда горючей смеси, сравнительного анализа и оценки разработанной конструкции газового двигателя для автотранспортных средств среднего и тяжелого класса, и оценки энергоэффективности предлагаемых инновационных технических решений.

Диссертантом впервые теоретически и экспериментально подтверждена возможность конвертации дизеля в газовый вариант двигателя без ухудшения его мощностных показателей, топливной экономичности и экологических качеств, позволяющая создать двигатель для среднеразмерных и тяжелых транспортных средств, обеспечивающий выполнение нормативных требований ЕВРО-5 и выше.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы при проведении расчётных исследований газовых

двигателей как в части организации рабочих процессов, так и оптимизации систем питания, зажигания и воздухоснабжения.

Разработанные автором технические решения, методы исследования и рекомендации могут быть использованы при создании нового поколения газовых двигателей.

Следует отметить, что результаты диссертационной работы уже использованы при разработке ряда нормативно-правовых документов, внедрены в ООО «Русские Автобусы –Группа ГАЗ», ОАО «Автодизель», ОАО «КАМАЗ», в опытном производстве ФГУП «НАМИ».

Содержание диссертации и её завершенность.

В первой главе диссертации рассматриваются результаты анализа научно-технической литературы, посвящённой проблемам создания газовых двигателей, конвертированных из дизелей. Вполне справедливо отмечается, что основным фактором, сдерживающим возможности достижения высоких мощностных показателей, являются высокие температуры отработавших газов. Выполнен анализ причин снижения топливной экономичности газовых двигателей по сравнению с базовыми дизельными двигателями.

Заслуживает внимания выполненный автором анализ технических проблем при создании газовых двигателей в практике мирового двигателестроения.

В результате этого анализа автором предложено применить в газовых двигателях высокую геометрическую степень сжатия (на уровне базового дизельного двигателя), обеспечивающую высокую степень расширения, а для снижения склонности двигателя к детонации уменьшить эффективную степень сжатия путём применения укороченного такта впуска (цикла Миллера).

Важно отметить, что задачи, поставленные автором при выполнении диссертационной работы основаны также и на его собственном большом опыте по созданию газовых двигателей и газобаллонного оборудования.

Во второй главе рассмотрены результаты термодинамического анализа циклов на основе разработанных автором математических моделей. Анализ направлен на доказательство идеи применения укороченного такта впуска для газовых двигателей с высокой степенью сжатия. К сожалению, допущения, положенные в основу термодинамических циклов, не позволяют учитывать многие особенности процессов газообмена, смесеобразования, теплообмена, сгорания, протекающих в цилиндрах газовых двигателей. Эти процессы в настоящее время исследуются методами математического моделирования с использованием математических моделей, описывающих реальные процессы в цилиндрах двигателей, например, с использованием открытых термодинамических систем, с рассмотрением процессов газообмена, теплообмена, смесеобразования и сгорания с учетом изменения состава рабочего тела.

Изучение предложенного автором термодинамического цикла с управляемым открытием и закрытием впускного и выпускного клапанов с одновременным изменением степени сжатия (названный им «цикл СТДС»), позволил автору сделать ряд предложений для реализации эффекта продолженного расширения с целью снижения температур отработавших газов и снижения работы насосных ходов, что способствует повышению механического КПД на малых нагрузках.

В третьей главе приведены результаты расчётных и экспериментальных исследований особенностей протекания рабочих процессов газовых двигателей. Проведён сравнительный анализ индикаторных показателей бензиновых, дизельных и газовых двигателей. Приведены результаты расчётных исследований газового двигателя с учётом конечной скорости сгорания. Использована адаптированная в

ФГУП «НАМИ» двухзонная математическая модель процесса сгорания и образования выбросов оксидов азота, разработанная профессором В.А. Звоновым. В расчётные зависимости при определении параметров цикла автором внесены поправки, учитывающие то, что для цикла с укороченным тактом впуска действительные значения рабочего объёма, степени сжатия и коэффициента наполнения будут отличаться от геометрических. Проведен сравнительный расчётный анализ эффективных показателей (η_i , η_e и g_e) дизельного двигателя и газового двигателя, работающего по циклам Отто и Миллера.

Автором вполне справедливо отмечено, что при переходе от цикла с воспламенением от сжатия к циклу с искровым зажиганием будут действовать два фактора в противоположных направлениях. Первый – вследствие уменьшения степени сжатия с 16-18 до 11-13 ед. приведёт к снижению η_i на 5-7%, второй – из-за перехода с цикла со смешанным подводом теплоты на цикл с подводом теплоты при постоянном давлении будет способствовать повышению η_i на 6-8%. В результате доказана возможность достижения высокого КПД газового двигателя, практически на уровне дизельного двигателя. Рассмотрены показатели газовых и дизельных двигателей на частичных нагрузках.

В результате анализа расчётных и экспериментальных исследований рабочих процессов газового двигателя выявлены пути улучшения его показателей и сформулированы технические требования к газовому двигателю нового поколения, конвертированному из дизельного двигателя, его системам и компонентам.

В четвёртой главе приведены результаты расчётной оптимизации систем газового двигателя с укороченными тактами впуска и выпуска с целью выбора конструкции.

Автор вопросы оптимизации сводит к решению следующих задач:

- оптимизации фаз газораспределения;

- оптимизации системы питания;
- оптимизации системы воздухоснабжения.

Расчётная оптимизация фаз газораспределения включала в себя определение соотношения степени сжатия и степени расширения с целью достижения в высоконаддувном двигателе максимальных значений эффективного КПД и среднего эффективного давления давления . При этом автор установил наличие оптимального диапазона соотношений действительных степеней расширения и сжатия, при которых достигаются наилучшие показатели газового двигателя с наддувом.

Реализован способ профилирования впускного клапана, отличающийся от способов, применяемых другими разработчиками двигателей с циклом Миллера. Суть этого подхода заключается в том, что были изменены профили не только на фазе закрытия, но и на фазе подъёма впускного и выпускного клапанов с применением вогнутого профиля. Этот приём позволит на 10-12% увеличить «время-сечение» открытого состояния клапанов и повысить наполнение цилиндров свежим зарядом при сохранении «времени-сечения» выпускного клапана при укороченном такте выпуска. При оптимизации фаз газораспределения автор обратил внимание на работоспособность клапанного привода, принимая во внимание контактные напряжения в пятне контакта кулачок-толкатель, протекание диаграмм подъема клапана и ускорений толкателя. Оптимизация профиля кулачка выполнялась с помощью программы на базе методики Л.В. Корчемного. Задача сводилась к отысканию варианта, при котором для организации цикла Миллера сокращение фазы впуска осуществлялось при сохранении допустимых нагрузок в ГРМ при приемлемом сокращении времени-сечения. Был выполнен поверочный расчет напряжений в паре кулачок-толкатель, который показал, что существующая конструкция привода пригодна для применения в газовой модификации двигателя либо с минимальными изменениями(замена марки

бронзы либо вообще без изменений. К сожалению, автор не привел материалов по проверке неразрывности кинематической цепи привода вследствие продольных колебаний штанги при нижнем расположении распределительного вала при повышенных частотах вращения коленчатого вала.

Приведены результаты работ по созданию и оптимизации системы питания с фазированным распределённым впрыском газа и исследованию особенностей процесса смесеобразования в двигателе с укороченным тактом впуска.

Автором исследованы пути достижения максимально возможных значений среднего эффективного давления по внешней скоростной характеристике за счёт оптимизации системы воздухоснабжения, включающей устройства регулирования наполнением (дроссельный узел, ДУ), систем наддува и охлаждения надувочного воздуха.

В результате разработанных методов оптимизации фаз газораспределения, систем питания и воздухоснабжения и проведенных расчётных исследований выбраны конструктивные параметры систем двигателя для экспериментальных исследований.

В пятой главе автор рассматривает результаты экспериментальных исследований по оптимизации систем газового двигателя.

Представляет интерес результаты исследования показателей базового дизельного двигателя, и трёх вариантов газовых двигателей, построенных на его базе. Первый вариант – газовый двигатель без изменения степени сжатия и штатным распределительным валом. Второй вариант – газовый двигатель с уменьшенной (до 11,5 ед) степенью сжатия и штатным распределителем. Третий вариант - газовый двигатель без изменения степени сжатия (17,5 ед) и двумя вариантами распределителей: - с укороченным тактом впуска с базовым профилем кулачка выпускного клапана, и с укороченными тактами впуска и выпуска.

В диссертации исследованы вопросы, связанные с аномальными отклонениями от нормального сгорания в газовых двигателях. Показано, что в двигателе, конвертированному в газовый по циклу Миллера, без изменения геометрической степени сжатия и с сохранением поршня с «камерой в поршне» удается добиться бездетонационной работы во всём диапазоне нагрузочных и скоростных режимов. Автор принял решение о сохранении «дизельной» формы камеры сгорания в поршне. Форму камеры в поршне для газового варианта следует оптимизировать (работы Р.З. Кавтарадзе, А.И. Гайворонского, А.А. Зеленцова).

Разработан алгоритм управления двигателем по защите его от детонации, заключающийся в согласованном управлении углом опережения зажиганием и дроссельной заслонкой на аварийных режимах.

Приведены результаты испытаний газового двигателя с системой нейтрализации TWC по достижению требований экологического класса 5. Показаны пути достижения требований экологического класса 6.

По окончании исследований с проведением экспериментов по комплексной оптимизации систем газового двигателя (фаз газораспределения, систем воздухоснабжения, питания и зажигания) с высокой степенью сжатия и с укороченными тактами впуска и выпуска были определены его внешняя скоростная и нагрузочные характеристики.

В результате выполненных экспериментальных исследований показана возможность существенного улучшения (на 10-20%, в зависимости от нагрузки) улучшения эффективного расхода газового топлива по сравнению с газовым двигателем, конвертированным из дизеля с использованием классического цикла Отто, показана возможность достижения эффективного расхода газового топлива на уровне 180-190 г/кВтч ($\eta_e=0,42 - 0,39$) в широком диапазоне нагрузок (от 60 до 100 % от полной), доказана возможность форсирования газового двигателя до уровня 27-30 кВт/литр, и до среднего эффективного давления 1,8 МПа за

счет оптимизации систем питания и зажигания, фаз газораспределения и системы турбонаддува.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований автомобилей и автобусов, оснащённых разработанным газовым двигателем и приведены результаты оценки эффективности разработанных технических решений по полному жизненному циклу.

Результаты всесторонних испытаний автотранспортных средств подтвердили высокую эффективность разработанного газового двигателя.

В целом диссертация посвящена решению важной научной и технической задачи – достижению высоких энергетических и экономических показателей газовых двигателей и представляет собой завершённую научную работу, имеет внутреннее единство и содержит совокупность новых научных результатов и положений, сделанных на основе расчётных и экспериментальных исследований.

Содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в публикациях автора и автореферате.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Достоинство работы заключается в проведении исследований в широком диапазоне – от термодинамического анализа циклов, расчётных исследований рабочего процесса, исследований на полноразмерных двигателях с различными вариантами исполнения систем воздухоснабжения, систем питания и зажигания, распределителей с вариантами фаз газораспределения до исследований на автотранспортных средствах.

Достоинством работы являются разработанные автором расчётные модели термодинамических циклов и методы комплексной оптимизации газового двигателя и его систем.

Одним из ценных достижений автора является раздел 5.5 Оптимизация системы зажигания с целью предотвращения отклонений от нормального сгорания в газовых двигателях, в котором автор поместил материал о детонационной стойкости газовых топлив. В этом разделе читатель знакомится с методом определения детонационной стойкости по «метановому числу» (МЧ). Там же популярно изложены методы предупреждения детонации в газовых двигателях.

Следует отметить и достаточно большое количество объектов, на которых проводились исследования – 8 двигателей и шесть автотранспортных средств.

Отдельно следует отметить материал в подразделе 5.7 – результаты комплексной оптимизации систем двигателя.

По работе имеется ряд замечаний.

1. Создатели двигателей вступили в этап виртуального проектирования, который требует применения для оценки показателей качества виртуальных объектов широкого набора математических моделей высоких уровней. Применительно к рассматриваемой работе в дополнение к разработанным автором моделям термодинамических циклов, в которых невозможно адекватно учесть сложные физико-химические процессы в цилиндрах двигателей, требуется рассмотрение моделей более высоких уровней, реализованных в программных продуктах Boost, VAVE, GT-Power, Дизель-РК, Альбяя, FIRE, KIVA, VECTIS, STAR-CD и др.

2. Автор обосновал работу газового двигателя на стехиометрической смеси. Однако многие построенные газовые двигатели с успехом работают на бедных смесях. У каждого из этих способов организации рабочего процесса есть своя экологическая ниша.

3. Автор, анализируя возможности цикла Миллера в повышении энергоэффективности газовых двигателей не оценил эффект внутреннего

охлаждения смеси в цилиндре после завершения укороченного такта впуска впуска. Это – еще один плюс укороченного такта впуска.

4. К сожалению, при оценке работоспособности клапанного привода автор не выполнил проверки неразрывности кинематической цепи привода вследствие продольных колебаний штанги при нижнем расположении распределительного вала при повышенных частотах вращения коленчатого вала.

5. В главе 5 приведены скоростные характеристики газового двигателя, на основе которых утверждается что они на уровне базового дизеля. Однако для такого вывода желательно привести для сравнения хотя бы отдельные контрольные точки характеристик дизельного двигателя.

6.. Алгоритмы управления распределенной фазированной подачей газа, дроссельной заслонкой, перепускным клапаном ТКР, системой зажигания и составом топливо-воздушной смеси по обратной связи с лямбда-зондом представлены в разных разделах, а желательно было бы сгруппировать их а отдельном разделе.

7. Автор утверждает, что в связи с высоким уровнем метана в ОГ требуется увеличение в 3 – 5 раз содержания в нейтрализаторе благородных металлов. Возможно, что это в значительной мере объясняется несовершенством системы нейтрализации в целом.

8. Закон Ф. Пашена справедлив для искрового зажигания. Если система зажигания другая (например, лазерная), то там другие проблемы.

9. При подборе агрегатов наддува, проектировании впускной и выпускной систем, охладителей надувочного воздуха обычно выполняют согласование гидравлической характеристики двигателя и характеристик компрессора и турбины с использованием имитационной модели двигателя, позволяющей анализировать показатели переходных процессов. Автор выполнял выбор системы турбонаддува с помощью расчетных исследований по программе «НАМИ», моделирующей внешнюю скоростную характеристику газового двигателя с турбонаддувом,

охлаждением надувочного воздуха и рециркуляцией выпускных газов с последующей экспериментальной оценкой выбора ТКР с оптимизацией алгоритма управления углом опережения зажигания и углом открытия дроссельной заслонки.

10. В диссертации и автореферате имеются описки и недостатки в оформлении рисунков. Например, рисунок 36 на стр. 154 не читается (нет контрастности, бледен).

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, которая выполнена на высоком научном уровне на актуальную для отечественного двигателестроения тему. Отдельно имею честь отметить, что соискатель известен в кругах двигателестроителей и исследователей своей творческой научной и внедренческой активностью. Им выполнено большое количество научных исследований, внедренных в конструкциях двигателей и их компонентов, в методических документах по эксплуатации автотранспортных средств

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Таким образом, диссертация Лукшо В.А. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема по теоретическому и экспериментальному обоснованию возможности создания энергоэффективного газового двигателя для транспортных средств, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора

технических наук, а ее автор Владислав Анатольевич Лукшо, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.02 –Тепловые двигатели.

Заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук профессор
кафедры «Поршневых двигателей»
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Н.А. Иващенко Н.А. Иващенко

07.12.2015 г.



Справочные данные: Иващенко Николай Антонович, д.т.н., профессор кафедры «Поршневые двигатели» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, тел. 8 (495) 265-78-92

e-mail: ivaschen@mail.ru