

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Лысова Игоря Олеговича

«Улучшение смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания и параметров топливоподачи при форсировании транспортного дизеля», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

1. Актуальность избранной темы

Улучшение энергетических характеристик транспортных силовых установок на номинальных и переходных режимах является крайне актуальной задачей. Современный поршневой двигатель внутреннего сгорания, обладающий улучшенной динамикой разгона, существенно улучшает технические характеристики транспортного средства как гражданского, так и военного назначения.

Мировой опыт создания перспективных силовых установок показывает, что при создании новых и модернизации существующих поршневых двигателей крайне важно оценивать соотношение улучшений эксплуатационных характеристик ДВС, которые достигаются путем внедрения инновационных решений и увеличения стоимости жизненного цикла изделия в целом, вызванное внедрением предложенных инноваций. Решения подобных задач сопряжены с необходимостью комплекса инженерно-технологических исследований и проработок в отношении улучшения процессов смесеобразования и сгорания топлива при сохранении требуемой термopрочности и надежности, снижения общей массы силовой установки и улучшения массогабаритных показателей, оптимизации процессов газообмена во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы ДВС и проведения соответствующего эксергетического анализа эффективности внедрения соответствующих конструктивных и технологических изменений. Одним из эффективных способов улучшения процессов смесеобразования и сгорания ДВС на различных режимах работы является использование верифицированной математической модели, которая позволяет учитывать конструктивные особенности основных деталей камеры сгорания, параметров кривошипно-шатунного механизма и конструкции элементов топливной аппаратуры. Таким образом, разработка подобной математической модели и проведение многопараметрической оптимизации с использованием данной модели с получением оптимальных конструктивных и регулировочных параметров является **крайне актуальной задачей**, которая позволит улучшить не только динамические характеристики ДВС, но и существенно улучшить индикаторный КПД и снизить концентрацию вредных веществ в отработавших газах. Необходимо отметить, что данные результаты крайне важны при обеспечении унификации ДВС специального назначения и ДВС для гражданских транспортных средств, обеспечивающих массовый сегмент рынка.

В связи с этим тема диссертационной работы Лысова И.О. представляет научный и практический интерес.

2. Оценка структуры и содержания диссертационной работы

Объем диссертационной работы составляет 151 страницу. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 129 наименований, и оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми ВАК РФ к подобному виду работ. Структура и оформление автореферата и диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Автореферат содержит основные положения представленной диссертации.

Во **введении** представлены актуальность темы диссертации, степень её разработанности, основные методы исследования, степень достоверности и сведения об апробации и публикациях результатов работы. Сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** автором выполнен обзор и анализ работ, в которых рассмотрены проблемы и представлены известные технические решения, соответствующие поставленной цели и задачам диссертационного исследования. В частности, проанализированы работы, выполненные сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ и Dalian University of Technology по улучшению качества смесеобразования и сгорания в транспортных дизелях с непосредственным впрыском и расположением топливной форсунки, не совпадающим с осью камеры сгорания.

В зависимости от сложности задач, решаемых при исследовании процесса сгорания, автором классифицированы известные виды математических моделей, которые применяются для численного моделирования рабочего цикла дизеля.

В обзоре также представлен анализ современных подходов, применяемых при экспериментальных исследованиях процессов впрыскивания и смесеобразования с использованием специально разработанных безмоторных стендов, в состав которых входит камера постоянного объема с прозрачными окнами и скоростная видеокамера.

Во **второй главе** приведена разработанная математическая модель процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания и увеличенной цикловой подачей топлива. Также представлена усовершенствованная математическая модель процесса сгорания с применением законов химической кинетики в объеме, занимаемом топливными факелами.

Для моделирования процесса смесеобразования автором составлены системы уравнений, описывающие изменение длины и объема топливных факелов, как при свободном их развитии до касания стенок камеры сгорания в поршне, так и при отражении в надпоршневой зазор в периферийной зоне камеры сгорания. При этом автор делает допущение, что впрыскиваемое топливо распределяется равномерно в объеме топливных факелов. В эти уравнения

включены выражения, позволяющие учесть геометрические параметры топливных факелов и поверхностей, образующих объём сжатия, а также изменение длины факелов и величины надпоршневого зазора в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Для моделирования процесса сгорания в пределах объёма, занимаемого топливными факелами, автор воспользовался известной математической моделью процесса сгорания д.т.н. В.Г. Камалтдинова, которая представлена в обзоре. Автор рассматриваемой диссертационной работы развил эту модель для применения только к части камеры сгорания дизеля, занимаемой топливными факелами. При этом автор принимает допущение, согласно которому в расчёте сгорания участвует только доля кислорода, находящаяся в этом объёме, и эта доля увеличивается при движении поршня вниз от верхней мертвой точки.

Из содержания второй главы можно заключить, что математические модели учитывают особенности процессов смесеобразования и сгорания, а также форму и размеры камеры сгорания в поршне в форсированном транспортном дизеле с объемным способом смесеобразования и увеличенной цикловой подачей топлива. Они были положены в основу алгоритма и программы расчета рабочего цикла дизеля, позволившей автору выполнить комплекс расчетно-теоретических исследований, результаты которого приведены в четвертой главе.

В **третьей главе** приведено описание разработанной и изготовленной в ЮУрГУ (НИУ) при непосредственном участии автора безмоторной моделирующей установки. Установка включает в себя универсальную камеру постоянного объема, оснащённую оптическими окнами для визуального наблюдения и видеорегистрации процессов впрыска и смесеобразования, протекающих внутри камеры. В качестве отличительной особенности безмоторной установки можно выделить электронное управление единичным впрыском и синхронным включением высокоскоростной цветной видеокамеры. Автором разработаны и реализованы методики проведения экспериментальных исследований на данной безмоторной моделирующей установке и обработки полученных результатов.

Экспериментальные исследования процессов впрыска и смесеобразования дизельного топлива автором проведены в камере постоянного объема с наклонным положением электромагнитной форсунки к оси камеры. Такое положение форсунки соответствует ее установке в головку блока цилиндров форсированных транспортных дизелей ЧН15/16 производства ООО «ЧТЗ-Уралтрак». В результате проведения экспериментов получены данные, представляющие научный и практический интерес. В частности, определены закономерности изменения длины и угла конуса топливных факелов в процессе впрыска без воспламенения для трёх видов распылителей с различными диаметрами и количествами распыливающих отверстий. Данные получены при различных величинах давления в камере постоянного объема и в топливном аккумуляторе. Также получены результаты экспериментального моделирования характера взаимодействия топливного факела со стенками камеры сгорания и его отражения в надпоршневой зазор. В результате автор работы экспериментально

установил, как и насколько топливные факелы, образованные всеми тремя распылителями, отличаются по длине и динамике развития.

В этой же главе автор рассматриваемой диссертационной работы представил полученные результаты сравнительных испытаний топливной форсунки со штатным распылителем, имеющим 8 отверстий диаметром 0,3 мм, и опытным распылителем. Существенным отличием опытного распылителя является то, что 4 распыливающих отверстия, направленные в противоположную сторону от движения топлива в корпусе распылителя, имеют увеличенные диаметры до ~0,50 мм. Результаты экспериментов показали, что опытный распылитель обеспечил более равномерное развитие всех топливных факелов при наклонном положении электромагнитной форсунки.

В **четвертой главе** приведены результаты расчётных исследований влияния параметров, применённых автором при математическом моделировании процесса смесеобразования, на показатели процесса сгорания и рабочего цикла форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16. В расчётах была учтена динамика развития топливных факелов при применении топливной аппаратуры аккумуляторного типа. Показано, как изменяются скорости смешения и сгорания паров топлива, а также индикаторные показатели рабочего цикла дизеля в зависимости от новых параметров – коэффициента коррекции закона впрыска, доли топлива в первой половине процесса смешения и продолжительности процесса смесеобразования. Результаты расчетного исследования позволили автору выявить влияние размеров и объёма топливных факелов на процесс сгорания и показатели рабочего цикла. При этом параметры топливных факелов определялись в зависимости от момента начала подачи топлива, угла конуса топливных факелов и средней скорости движения их вершины.

Приведённые результаты расчётных исследований позволили автору предложить два технических решения для улучшения смесеобразования и индикаторных показателей рабочего цикла форсированного транспортного дизеля ЧН15/16 с наклонной форсункой. Первое техническое решение предполагает трансформировать штатную камеру сгорания в поршне таким образом, чтобы более длинные топливные факелы имели большую длину свободного развития до достижения периферийной наклонной стенки, а менее длинные имели, соответственно, меньшую длину свободного развития. При этом центральная часть камеры сгорания в поршне остаётся без изменения, а периферийная наклонная стенка смещается в сторону более длинных факелов.

Второе техническое решение предполагает применение распылителя с четырьмя штатными (по 0,3 мм) и четырьмя увеличенными до ~0,50 мм диаметрами распыливающих отверстий, который обеспечил меньшее различие в динамике развития топливных факелов при экспериментах, описанных в третьей главе.

Для количественной оценки эффективности применения второго технического решения автором приведено расчётное обоснование, которое показало, что при применении распылителя с четырьмя увеличенными диаметрами распыливающих отверстий возможно улучшение индикаторных

показателей рабочего цикла форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16 на ~1,0–1,5%. Это достигается в результате более равномерного распределения топлива по периферии штатной камеры сгорания.

В **заключении** автором приведены общие выводы, отражающие основные результаты диссертационной работы.

Текст работы имеет логическую последовательность, стиль изложения соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам.

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

Выводы, сформулированные в главах диссертации, и рекомендации обоснованы приведенными в тексте предпосылками и доводами, соответствуют цели и задачам исследования. Обоснованность полученных научных положений, выводов и рекомендаций обуславливается использованием поверенных и аттестованных средств измерения и регистрации, использованием современных методов научного анализа и обработки экспериментальных данных.

Диссертация в достаточной мере апробирована. Автором выполнено 18 публикаций по теме диссертации, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 6 статей в международных изданиях, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science. Результаты работы были представлены и обсуждены на научных конференциях и семинарах регионального, всероссийского и международного уровня.

4. Достоверность и новизна полученных результатов

При разработке и развитии математических моделей автор рассматриваемой диссертационной работы использовал общие законы химической кинетики, фундаментальные уравнения термодинамики, газодинамики, а также результаты теоретического и экспериментального исследования процессов смесеобразования и сгорания, представленные в работах других исследователей.

При проведении экспериментальных исследований автор использовал известные методики, представленные другими исследователями. При проведении испытаний топливной аппаратуры в камере постоянного объема применены современные аттестованные и сертифицированные средства измерений.

При выполнении диссертационной работы соискателем получены следующие результаты, обладающие **научной новизной**:

- разработанная математическая модель процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания и увеличенной цикловой подачей топлива, которая описывает изменение динамики развития топливных факелов до касания стенок камеры сгорания и

после их отражения в надпоршневой зазор и скорость изменения смещения молекул топлива с воздухом;

- усовершенствованная математическая модель расчёта процесса сгорания по закону Аррениуса в объёме, занимаемом топливными факелами, и учитывающая процесс диссоциации диоксида углерода;

- установленные закономерности изменения длины и угла конуса топливных факелов при различных условиях впрыска дизельной топливной аппаратурой аккумуляторного типа, которые были получены при экспериментальных исследованиях на созданной безмоторной моделирующей установке;

- установленные закономерности изменения индикаторных показателей рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16 в зависимости от закона впрыска и скорости смещения молекул топлива с воздухом и реальной динамики развития топливных факелов с применением топливной аппаратуры аккумуляторного типа.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость работы заключается в представленных моделях процессов смесеобразования и сгорания, учитывающих динамику развития и форму топливных факелов, взаимодействие факелов со стенками камеры сгорания в периферийной зоне. Это дает возможность предварительно оценить эффективность процесса сгорания и показателей рабочего цикла дизеля в зависимости от параметров модели процесса смесеобразования и определить целесообразность применения новых технических решений по элементам топливной аппаратуры и оптимизации формы камеры сгорания, ускоряя тем самым процесс разработки или доводки серийных транспортных дизелей.

Практическая значимость работы состоит в представленной компьютерной программе, в алгоритм которой включены разработанные модели, и которая внедрена и используется промышленным партнером, а также в учебном процессе. Практический интерес представляет также безмоторная моделирующая установка, созданная по современным зарубежным аналогам с учётом опыта проведения исследований смесеобразования и сгорания распыленного топлива предыдущими исследователями. Представлены рекомендации, которые, по мнению автора, обеспечат равномерное распределение топлива и воздуха по камере сгорания для форсированного транспортного дизеля типа ЧН15/16 с наклонной форсункой.

6. Замечания по диссертационной работе

1. Автор использует нестандартную терминологию: «объемный способ смесеобразования», «угол начала смесеобразования», «объёмно-пристеночное смесеобразование», в главе 3 при анализе различных характеристик и параметров исследуемого дизеля индикаторную диаграмму автор называет «графиком».

2. В п.1.3. автор делает анализ одной работы о влиянии формы камеры сгорания на процесс смесеобразования, но, в целом, в первой главе нет анализа работ о влиянии формы впускных каналов на процессы смесеобразования. Следует отметить, что в современных дизелях аналогичного типоразмера очень часто применяют тангенциальный и винтовой каналы для обеспечения оптимального вихревого отношения. Кроме того, автор не дает оценку влияния уровня кинетической энергии турбулентности в камере сгорания на процесс смесеобразования и сгорания и факторов, которые влияют на это (наличие лопаточной машины во впускном тракте, тип и форма камеры сгорания, форма впускных каналов и т.д.).
3. Существует установившаяся и уже общепринятая классификация моделей рабочего процесса, но автор во введении утверждает, что модели делятся на три вида: «модели первого вида, второго и третьего. Тем не менее, в п.1.2 представлена иная классификация моделей сгорания: «эмпирические/полуэмпирические, феноменологические и многомерные». Очевидно, что сравнивать эмпирические характеристики тепловыделения и модели сгорания для трехмерных расчетов и пытаться их использовать в общей классификация «моделей сгорания» некорректно. В итоге вызывает удивление, что после описания и анализа современных трехмерных моделей автор возвращается к анализу термодинамических моделей.
4. В п. 2.1.2. автор утверждает: «Второй участок характеризуется зависимостью формы и размеров топливных факелов только от изменения объема рабочего тела за счёт движения поршня от положения при 10 град. п.к.в. после ВМТ до нижней мёртвой точки (540 град. п.к.в.)». Не совсем понятно, о каких топливных факелах идет речь, когда поршень находится в НМТ.
5. В п.2.1.2. характерный параметр, определяющий форму КС, – угол наклона поверхности «бетта». Не ясно, как будет работать предлагаемая математическая модель и учитывать реальную геометрию КС в случае, если тип КС принципиально иной, например ЦНИДИ или «двойной Гессельман», которая активно используется на современных дизелях (ЯМЗ 530, ЯМЗ 780, М150 и т.д.).
6. Не вполне понятно, как предлагаемая модель процесса сгорания в объеме, занимаемом топливными факелами, представленная в п.2.1.2, учитывает фактическую задержку воспламенения? Очевидно, что задержка воспламенения оказывает существенное влияние на скорость нарастания давления и на уровень максимального давления в цилиндре, тем не менее, на всех расчетных индикаторных диаграммах, представленных в работе, визуальной такой задержки не просматривается. При этом в настоящее время имеются различные полуэмпирические формулы для определения этого параметра, которые хорошо себя зарекомендовали.

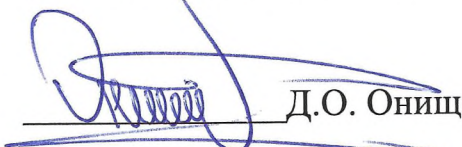
Заключение

В целом отмеченные замечания не снижают общей ценности работы. Диссертационная работа в целом производит хорошее впечатление, в ней достигнута поставленная соискателем цель исследования и решены запланированные задачи.

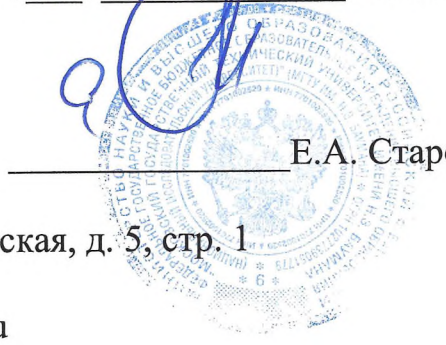
Диссертация Лысова И.О. по теме «Улучшение смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания и параметров топливоподачи при форсировании транспортного дизеля» можно характеризовать как самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи обеспечения высокого качества процесса смесеобразования при форсировании дизелей по среднему эффективному давлению за счет согласования формы топливных факелов с формой камеры сгорания.

Рецензируемая диссертационная работа соответствует критериям, установленным п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Лысов Игорь Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели».

Официальный оппонент
д.т.н., профессор кафедры
«Поршневые двигатели»
МГТУ им. Н.Э. Баумана


Д.О. Онищенко
« 5 » июня 2020 г.

Подпись Д.О. Онищенко подтверждаю,
Проректор по экономике и инновациям


Е.А. Старожук

Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Рабочий телефон: +7(4992)65-78-92

Адрес эл. почты: doctor@baumanracing.ru