



**Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации**

*федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования*

**«Алтайский государственный  
технический университет  
им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)**

пр-т Ленина, 46, г. Барнаул, 656038

Телефон: (3852) 29-07-10

Факс: (3852) 36-78-64

E-mail: altgtu@list.ru ;

[ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru);

ОКПО 02067824

ОГРН 1022201517854

ИНН/КПП 2224017710/222401001

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю  
диссертационного Совета  
Д 212.298.09 на базе  
ФГАОУ ВО «Южно-  
Уральский государственный  
университет (НИУ)»

д.т.н., профессору  
Рождественскому Ю.В.

454080, г. Челябинск,  
пр. им. В.И. Ленина, 76

**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
д.т.н., профессор  
А.М. Марков  
03 2020 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» на диссертационную работу Лысова Игоря Олеговича «Улучшение смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания и параметров топливоподачи при форсировании транспортного дизеля», представленную в диссертационный совет Д 212.298.09 на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели» (технические науки)

**1 Актуальность темы исследования**

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью улучшения мощностных, экономических и экологических показателей

транспортных дизелей и определена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Эффективным методом улучшения показателей является форсирование дизеля по среднему эффективному давлению. При форсировании дизеля решаются различные задачи, направленные на совершенствование отдельных процессов рабочего цикла, главным образом, на обеспечение качественного смесеобразования и сгорания в цилиндре поршневого двигателя.

Совершенствование элементов топливоподающей аппаратуры, в частности, топливной форсунки, согласования формы топливного факела с формой камеры сгорания позволяет улучшить качество процессов смесеобразования и сгорания в форсированном дизеле.

Таким образом, тема диссертационного исследования Лысова И.О. является актуальной, а его результаты имеют большой теоретический и практический интерес.

## **2 Оценка структуры и содержания работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации составляет 151 страницу.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы диссертации, показана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и сведения об апробации и публикации результатов работы.

В **первой главе** автором рассмотрены существующие проблемы и известные способы улучшения качества смесеобразования, предложенные отечественными (МГТУ, МАДИ) и зарубежными (Dalian University of Technology) исследователями, применяемые в транспортных дизелях при установке топливной форсунки под наклоном к оси камеры сгорания.

Рассмотрены известные виды расчётных моделей процесса сгорания в дизелях, применяемые в зависимости от сложности решаемых задач исследования, и методы проведения экспериментальных исследований процессов смесеобразования и сгорания на безмоторных экспериментальных установках, оснащенных камерой постоянного объема и современным измерительным и регистрирующим оборудованием.

По результатам анализа отечественной и зарубежной литературы автор отметил, что с развитием технологий вычислений и скоростной видеосъёмки изучение процессов впрыскивания и распыливания топлива, а также процессов смесеобразования и сгорания на безмоторных моделирующих установках становится более значимым. Поэтому проведение подобных экспериментальных исследований совместно с расчётно-теоретическими исследованиями, по мнению автора, позволит ускорить отработку процессов смесеобразования и сгорания и повысить их эффективность.



**Вторая глава** посвящена разработке математической модели процесса смесеобразования в форсированном транспортном дизеле с неразделенной камерой сгорания и увеличенной цикловой подачей топлива аккумуляторной системой топливоподачи. В предлагаемой модели закон впрыска топлива описывается гармонической функцией в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Введение коэффициентов коррекции закона впрыска и перераспределения топлива между первой и второй половиной процесса впрыска позволило автору задавать различные законы смещения топлива. Это позволило моделировать особенности работы как механической топливной аппаратуры с максимальной скоростью подачи вблизи середины процесса, так и аппаратуры типа Common Rail с максимальной скоростью в течение большей части впрыска и быстрым его началом и окончанием.

Для описания закона смещения автором составлены системы уравнений, описывающие изменение длины и объема топливных факелов как при свободном их развитии до касания стенок камеры сгорания, так и при отражении в надпоршневой зазор в периферийной зоне камеры сгорания. Применённые автором уравнения учитывают 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.

Математическая модель процесса сгорания базируется на известных уравнениях проф. В.Г. Камалтдинова, но применяется только к части камеры сгорания, занимаемой топливными факелами. При этом автор делает допущение, что в сгорании участвует только часть кислорода, находящаяся в этом объёме, которая увеличивается при движении поршня от ВМТ.

Описанные выше математические модели, учитывающие особенности процессов топливоподачи и смесеобразования, а также форму и размеры камеры сгорания в поршне, позволили автору разработать алгоритм и компьютерную программу расчета рабочего цикла дизеля, с помощью которой в дальнейшем выполнялись расчётные исследования.

В **третьей главе** приведено описание разработанной и изготовленной безмоторной экспериментальной установки, оснащенной камерой постоянного объема и высокоскоростной видеосъёмкой, методики проведения исследований на данной установке и обработки полученных результатов.

Экспериментальные исследования процессов впрыска и смесеобразования дизельного топлива проводились в камере постоянного объема при наклонном положении электромагнитной форсунки, характерном для форсированных транспортных дизелей ЧН15/16 производства ООО «ЧТЗ-Уралтрак». При этом получены интересные результаты изменения длины и угла конуса топливных факелов для трёх видов распылителей с различными диаметрами и количеством распыливающих отверстий при различных давлениях в камере постоянного объёма и в топливном аккумуляторе. Экспериментально установлено, что топливные факелы,



образованные всеми тремя распылителями, отличаются по длине в зависимости от угла наклона распыливающих отверстий относительно оси распылителя.

Повышенный интерес представляют результаты экспериментального моделирования взаимодействия топливного факела со стенками камеры сгорания, иллюстрирующие его отражение в надпоршневой зазор.

Здесь же приведены сравнительные результаты испытаний топливной форсунки со штатным распылителем, имеющим 8 отверстий диаметром 0,3 мм, и опытным распылителем, отличающимся тем, что 4 распыливающих отверстия, направленные в противоположную сторону от движения топлива в корпусе распылителя, имеют увеличенные диаметры до  $\sim 0,50$  мм. Они показывают, что опытный распылитель обеспечил более равномерное развитие по длине всех топливных факелов.

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждена правильным выбором средств и методов измерений, применением только аттестованных, современных приборов и оборудования.

В четвертой главе приведены результаты расчётных исследований влияния параметров, используемых при моделировании процесса смесеобразования, на показатели процесса сгорания и рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16 с учётом динамики развития топливных факелов топливной аппаратурой аккумуляторного типа. Показано, как изменяются скорости смешения и сгорания паров топлива, а также индикаторные показатели рабочего цикла дизеля в зависимости от коэффициента коррекции закона впрыска, доли топлива в первой половине процесса смешения и продолжительности процесса смесеобразования.

Повышенный интерес представляют результаты расчётного исследования влияния на процесс сгорания и показатели рабочего цикла размеров и объёма топливных факелов, которые определялись в зависимости от момента начала подачи топлива, угла конуса топливных факелов и средней скорости движения их вершины.

Автором предложены два варианта технических решений для получения наилучших индикаторных показателей рабочего цикла форсированного транспортного дизеля с наклонной форсункой. В первом варианте предполагается штатную камеру сгорания в поршне трансформировать, сместив периферийную часть таким образом, чтобы расстояние до периферийной наклонной стенки со стороны длинных топливных факелов увеличилось, а с противоположной, наоборот, уменьшилось. При этом центральную часть камеры предлагается оставить на прежнем месте. Во втором варианте предлагается применить распылители с различными диаметрами распыливающих отверстий, обеспечивающие более равномерное распределение топлива по периферийному объёму штатной камеры сгорания.

Приведено расчётное обоснование второго варианта технического решения, которое показывает, что применение распылителя с различными

диаметрами отверстий может обеспечить улучшение индикаторных показателей рабочего цикла на  $\sim 1,0\text{--}1,5\%$  за счёт более равномерного распределения топлива и температуры рабочего тела по периферийному объёму штатной камеры сгорания, что особенно важно при форсировании дизеля.

В **заключении** приведены выводы, отражающие основные итоги диссертационной работы. Полученные автором результаты соответствуют цели и задачам исследования, отражают её научную новизну и практическую ценность.

В целом содержание диссертации отражает весь объём проведённых автором исследований от анализа известной информации в области моделирования процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания до разработки новых расчётных моделей и экспериментальной установки, их применения для выявления закономерностей влияния топливоподачи на показатели рабочего цикла и обоснования новых технических решений по обеспечению наилучших индикаторных показателей рабочего цикла за счёт качественного смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания с параметрами топливоподачи при форсировании транспортного дизеля.

### **3 Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель процесса смесеобразования в дизеле с системой топливоподачи аккумуляторного типа и увеличенной цикловой подачей топлива, которая моделирует изменение количества испарившегося топлива в объёме, занимаемом топливными факелами и изменение объема топливных факелов с учетом профиля неразделенной камеры сгорания в периферийной зоне;
- развита математическая модель процесса сгорания, где сгорание моделируется с применением закона Аррениуса и протекает в объёме, занимаемом топливными факелами, с учетом процесса диссоциации диоксида углерода;
- выявлены закономерности развития топливных факелов при различных условиях впрыска топливной аппаратурой аккумуляторного типа, полученные при экспериментальных исследованиях на уникальной научной установке «Впрыск»;
- выявлены закономерности изменения индикаторных показателей рабочего цикла при форсировании транспортного дизеля типа ЧН15/16, зависящие от закона подачи топлива и реальной динамики развития топливных факелов при применении топливной аппаратурой аккумуляторного типа.



#### **4 Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

Значимым теоретическим результатом исследования являются модели процессов смесеобразования и сгорания, которые учитывают форму и размеры топливных факелов, камеры сгорания в поршне и надпоршневого зазора. Разработанные модели дают возможность при расчёте рабочего цикла форсированного транспортного дизеля исследовать влияние на индикаторные показатели независимо друг от друга скорости подачи топлива в объём топливных факелов и изменения их размеров при свободном развитии и отражении в надпоршневой зазор. И на этой основе производить предварительную оценку эффективности новых технических решений по топливной аппаратуре и форме камеры сгорания при форсировании транспортного дизеля.

Практической значимостью обладают:

- разработанная компьютерная программа для моделирования рабочего цикла форсированного транспортного дизеля, которая может быть использована для решения практических задач, возникающих при форсировании серийных и разработке новых транспортных дизелей;

- разработанная и изготовленная безмоторная экспериментальная установка, оснащенная камерой постоянного объёма с фронтальным и боковыми окнами из кварцевого стекла, программируемой системой управления единичным впрыском топлива, современным измерительным оборудованием и высокоскоростной цветной видеосъёмкой, а также методика проведения исследований единичного впрыска аккумуляторной системой топливоподачи;

- предлагаемые автором технические решения по трансформированию периферийной части штатной камеры сгорания и применению распылителей с различными диаметрами распыливающих отверстий, которые помогут уменьшить неравномерность распределения топлива в периферийном объёме открытой камеры сгорания типа Гессельман, возникающую при установке топливной форсунки под углом к центральной оси цилиндра.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждена их внедрением в ООО «ЧТЗ-Уралтрак» при создании перспективного транспортного дизеля типа ЧН15/16 и в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» при проведении расчетного моделирования рабочего цикла дизеля типа ЧН15/16 в рамках выполнения государственного контракта.

#### **5 Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность полученных научных результатов обусловлена применением поверенных и аттестованных, в соответствии с действующими нормативно-техническими документами, средств измерений.

Апробация материалов диссертации проводилась на 10 научных конференциях и семинарах регионального, всероссийского и международного уровня.

Основные результаты диссертации отражены в 4 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ. Также основные результаты диссертации отражены в 6 печатных работах в виде материалов конференций и статей в международных публикациях, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science. Опубликовано 6 тезисов доклада по результатам участия на ВНТК в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Получены 2 свидетельства государственного образца регистрации программы для ЭВМ.

#### **6 Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационного исследования могут быть применены при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при форсировании транспортных дизелей в части, касающейся совершенствования параметров топливной аппаратуры и профилирования открытой камеры сгорания.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано для выполнения оценочных расчётов при выборе конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры типа Common Rail для перспективных транспортных дизелей. Это позволит существенно снизить затраты времени и средств на проведение моторных испытаний и конструкторско-доводочных работ.

Изготовленная безмоторная экспериментальная установка является уникальной и единственной в Российской Федерации, позволяющей проводить комплексные экспериментальные исследования с моделированием процессов топливоподачи и смесеобразования в широком диапазоне давлений, температур, продолжительности управляющих импульсов и цикловых подач топлива. Такие исследования процесса впрыска позволят не только проконтролировать и повысить качество изготовления серийных форсунок для дизелей различного назначения, но и подобрать параметры топливной аппаратуры для новых высокофорсированных и малотоксичных дизелей.

#### **7 Замечания по диссертационной работе**

В целом диссертационная работа Лысова И.О. заслуживает высокой оценки. В качестве замечаний можно отметить следующие:



1. В диссертации не показано, какими преимуществами обладают предложенные автором математические модели по сравнению с рассмотренными в обзоре известными широко используемыми моделями, например, с моделями Разлейцева-Кулешова и Н. Hiroyasu.

2. Из содержания диссертации и автореферата не понятно, каким образом в предложенных математических моделях при расчете рабочего цикла учитываются профиль камеры сгорания и деформация топливного факела при его отражении в надпоршневой зазор.

3. Безмоторные экспериментальные исследования процессов впрыска и смесеобразования дизельного топлива проведены в «холодной» камере постоянного объема, в которой температура сжатого воздуха не превышала 20°C, что не позволило оценить формирование топливно-воздушной струи с учетом испарения капель топлива, определяющего процесс воспламенения и сгорания смеси.

4. В диссертации не приведены экспериментальные данные моторных испытаний дизеля (одноцилиндрового или полноразмерного), которые бы подтверждали расчётные закономерности изменения параметров рабочего цикла, эффективность смещения периферии камеры сгорания в сторону более длинных топливных факелов или применения форсунки с различными диаметрами распыливающих отверстий.

5. Результаты расчетов для обоснования второго технического решения по применению распылителя с различными диаметрами распыливающих отверстий для выравнивания динамики развития всех топливных факелов приведены только для номинального режима работы дизеля, тогда как транспортные двигатели большую часть времени работают на частичных режимах.

6. В разделе 3.3 диссертации на рис. 3.9, 3.11 и 3.39 опытная динамика длины топливного факела на начальном участке приведена практически линейной от времени (кроме факела 5), однако численное моделирование на кафедре ДВС АлтГТУ (модель проф. Сеначина П.К.) показывает, что на начальном участке она близка к параболе третьей степени. Кстати, на рис. 3.36а, 3.37а, 3.38а (факелы 4 и 5) динамика длины факела именно так и выглядит.

7. Требуется дополнительное пояснение следующее: как учитывался точный момент начала и окончания впрыска при регистрации с учетом по кадровой съемке. (Один кадр примерно 0,1 мс). В выводах на стр. 103 отмечено: «...задержка начала процесса впрыска топлива от момента начала подачи электрического импульса управления форсункой для всех распылителей составила 0,3 мс».

8. В диссертации отсутствуют какие-либо сведения о подаче заявок на изобретение (полезную модель) или о государственной регистрации заявок в Роспатенте (ФИПС) на исследованные технические решения.

9. К сожалению, в диссертации имеются отдельные опечатки, например, лишние «2.» в начале второго вывода на стр. 60 или пропущенное



слово «между» в четвёртом выводе на стр. 105.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической ценности выполненных автором исследований и не ставят их под сомнение.

### Заключение

В целом необходимо отметить, что диссертационное исследование выполнено автором самостоятельно, обладает внутренним единством, диссертация изложена грамотным техническим языком, оформлена в полном соответствии с требованиями ВАК. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели», так как в ней изложены результаты, соответствующие п. 1 области исследований специальности: теоретические и экспериментальные исследования тепловых, газодинамических, гидродинамических, механических и физико-химических процессов в двигателях и их системах. Требования к публикации основных результатов в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, соблюдены. В тексте даны ссылки на источники информации и авторов. Содержание автореферата полностью соответствует диссертации в части основных положений, результатов и выводов.

Таким образом, диссертационная работа Лысова И.О. «Улучшение смесеобразования и сгорания путем согласования формы камеры сгорания и параметров топливоподачи при форсировании транспортного дизеля» является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме, соответствует критериям, установленным п.п. 9...14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор, Лысов Игорь Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.02 – «Тепловые двигатели».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» (протокол № 8 от 24.03.2020).

Д.т.н., профессор  
Свистула Андрей Евгениевич,  
заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»  
ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»

24.03. 2020 г.

Докторская диссертация по специальности 05.04.02 – тепловые двигатели.

Адрес организации: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Рабочий телефон: +7(3852)29-07-10. Адрес эл. почты: [altgtu@list.ru](mailto:altgtu@list.ru)