

На правах рукописи



Смолин Андрей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ПУСКЕ ДИЗЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
С ПОМОЩЬЮ СВЧ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в Омском автобронетанковом инженерном институте (филиале Военной академии материально-технического обеспечения Министерства обороны РФ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Руднев Валерий Валентинович.

Официальные оппоненты:

Камалтдинов Вячеслав Гилимянович,
доктор технических наук,
(ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ), доцент кафедры)
г. Челябинск;
Малышев Анатолий Федорович,
кандидат технических наук, доцент,
(ФГБОУ ВПО ЧГАА, доцент кафедры)
г. Челябинск.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

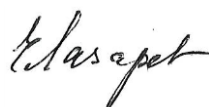
Защита диссертации состоится 29.01.2014 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, на имя ученого секретаря диссертационного совета. Тел/факс (351)267-91-23, электронная почта: *D212.298.09@mail.ru*

Автореферат разослан « » декабря 2013 г.

Ученый секретарь специализированного
диссертационного совета Д 212.298.09,
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В связи с преобладанием на территории Российской Федерации климатических зон с низкими зимними температурами и малой эффективностью устройств облегчения пуска обеспечение его надежности для дизелей мобильной техники (МТ) является актуальной проблемой, требующей новых технических решений.

Технический уровень МТ во многом определяется временем предпусковой подготовки и пуска дизелей. Учитывая тенденции развития отечественных и зарубежных МТ, в ближайшей перспективе необходимо обеспечить надежный пуск дизеля без средств предпусковой подготовки при температуре окружающей среды минус 35 °С и ниже.

Степень разработанности темы исследования

Изучением проблемы пуска дизелей в условиях отрицательных температур занимаются специальные лаборатории России, стран Европы и Америки. В этой области следует отметить работы: Болтинского В.Н., Брилинга Н.Р., Чудакова Е.А., Толстого А.М., Вырубова Д.Н., Корницкого В.В., Купершмидта В.А., Менделевича Я.А., Микулина Ю.Б., Энглиша Б.А., Моисейчика А.Н., Минкина М.Л., Лосавио Г.С., Сметнева Н.Н., Копылова Ю.М., Хвощева И.С., Ротрок Р., Остена А.Е., Лана В.Т., Невельсон Ф.Л., Ульцхеймёр Г.И., Блоуз Д.Ф., Клауд Г.Х., Клиш И.Х., Рикардо Г.Р. и многих других авторов, которые внесли значительный вклад в решение проблемы пуска двигателей внутреннего сгорания при низких температурах окружающей среды. Однако проблемы пуска дизелей при температурах окружающей среды от минус 35⁰ до минус 50⁰С изучены недостаточно полно.

Пуск холодного дизеля затруднен вследствие: низкой температуры воздушного заряда; повышенного сопротивления проворачиванию коленчатого вала и перемещению других, кинематически связанных с ним, деталей (поршни, детали механизма газораспределения и т.д.) из-за увеличенной вязкости масла; ухудшения условий распыливания топлива; усиленной теплоотдачи в стенки цилиндра и утечки воздушного заряда.

Как показал анализ исследований, выполненных ранее, существующие системы и устройства облегчения пуска не в полной мере удовлетворяют требованиям ко времени подготовки к пуску, выходу на режим нагрузки, продолжительности работы средств облегчения пуска и предельным температурам пуска. Удовлетворение этих требований возможно применением нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизелей в условиях низких температур для повышения качества смесеобразования.

Используя СВЧ нагрев при рациональном подборе частоты и параметров камер источника, можно получить равномерную концентрацию тепловой энергии в объеме нагреваемого тела. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепловую энергию возрастает прямо пропорционально частоте и квадрату напряженности электрического поля. При этом следует отметить беспроводную передачу СВЧ энергии практически к любому участку нагреваемого тела.

Под действием внешнего переменного электромагнитного поля в материале происходит колебательное движение молекул и их переориентация, в

результате чего в теле возникают токи проводимости и смещения. Совокупность этих явлений и обеспечивает нагрев материала.

Основными преимуществами СВЧ нагрева являются: тепловая безынерционность; высокий коэффициент полезного действия (КПД) преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел; возможность осуществления и практического применения новых необычных видов нагрева (избирательного, равномерного, сверхчистого).

Таким образом, налицо имеется **противоречие** между высокими потенциальными возможностями применения СВЧ энергии для оптимизации характеристик впрыскивания и распыливания топлива при пуске дизелей в условиях низких температур и отсутствием научно обоснованного способа реализации СВЧ нагрева в топливной аппаратуре дизелей.

Цель работы. Повысить качество процесса смесеобразования топлива и воздуха при осуществлении пуска дизеля в условиях низких температур.

Научная задача. Теоретическое обоснование возможности использования СВЧ энергии для нагрева топлива и повышения качества процесса смесеобразования при пуске дизелей в условиях низких температур.

Объект исследования. Процесс пуска дизеля в условиях низких температур.

Предмет исследования. Процесс смесеобразования в дизеле при нагреве топлива перед впрыскиванием с помощью СВЧ энергии.

Научная гипотеза. Повышение качества образования топливовоздушной смеси при пуске дизеля в условиях низких температур возможно путем нагрева топлива перед впрыскиванием с помощью СВЧ энергии.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ особенностей процесса пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха и способов его облегчения;
2. Разработать способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива перед впрыскиванием с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля;
3. Уточнить математическую модель для оценки качества смесеобразования топлива, нагретого с помощью СВЧ энергии;
4. Разработать методику экспериментальных исследований по оценке особенностей и качества смесеобразования при пуске дизеля в зависимости от параметров СВЧ нагрева топлива;
5. Провести технико-экономическую оценку эффективности повышения качества смесеобразования при пуске дизеля в условиях низких температур.

Методология и методы исследования базируются на использовании программных комплексов «MathCAD» и «Excel» для ЭВМ и автоматизированных средств измерения. Анализ и обобщение результатов научных исследований осуществлялись с использованием математической и статистической обработки экспериментальных данных по результатам исследований.

Научная новизна состоит в:

- использовании СВЧ энергии для нагрева топлива в трубопроводе высокого давления перед впрыскиванием при пуске дизеля для повышения качества смесеобразования;

- уточнении математической модели для оценки качества смесеобразования топлива, нагретого СВЧ энергией, учетом его движения по трубопроводу высокого давления, коэффициента теплоотдачи от него топливу и наименее нагретым элементам системы;

- обосновании структурной реализации системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива в трубопроводе высокого давления.

Теоретическая и практическая значимость состоит в следующем:

- разработке способа теоретической оценки повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур;

- создании устройства генерации СВЧ энергии для применения в дизелях;

- разработке методики экспериментальных исследований по определению значений параметров при СВЧ нагреве топлива;

- определении оптимальных параметров источника СВЧ энергии и рекомендаций по его использованию.

На защиту выносятся:

- способ повышения качества смесеобразования с учетом нагрева топлива в трубопроводе высокого давления за счет СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур;

- уточненная математическая модель оценки качества смесеобразования топлива, нагретого СВЧ энергией, с учетом его движения по трубопроводу высокого давления, коэффициента теплоотдачи топливу и наименее нагретым элементам системы;

- результаты экспериментальных исследований и выработанные рекомендации.

Достоверность основных положений и полученных результатов диссертационной работы подтверждается: теоретическим обоснованием возможности обеспечения пуска дизелей в условиях низких температур с использованием СВЧ энергии; современными методами решения системы уравнений с использованием пакетов «MathCAD» и «Excel»; применением современных методов исследования в соответствии с ГОСТ, измерительного оборудования и корректной статистической обработкой экспериментальных данных с использованием ЭВМ.

Реализация работы. Результаты выполненной работы внедрены и используются при выполнении курсовых и дипломных работ, а также при чтении отдельных разделов курсов лекций по дисциплинам «Двигатели военной автомобильной техники», «Энергетические установки транспортных средств специального назначения» и «Теплотехника» в Омском автобронетанковом инженерном институте (филиале Военной академии материально-технического обеспечения); Челябинском государственном педагогическом университете; при разработке перспективных планов на автобазе УФПС (г. Челябинск); МУП «ЧСТ» (г. Челябинск).

Апробация работы.

Основные положения диссертационного исследования обсуждены и одобрены на межрегиональной научно-технической конференции «Повышение эффективности колесных и гусеничных машин многоцелевого назначения», 2010 г. (г. Челябинск); 8-й международной научно-практической кон-

ференции «Образование и наука без границ», 2012 г. (г. Прага); 8-й международной научно-практической конференции «Перспективные вопросы мировой науки», 2012 г. (г. София); в материалах 8-й международной технической научно-практической конференции «Научная индустрия европейского континента», 2012 г. (г. Прага); 7-я Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования», 2012 г. (г. Омск); научно-практической конференции ВНО «Повышение надежности и боевой эффективности многоцелевых гусеничных и колесных машин», 2012 г. (г. Омск).

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 11 печатных работах, из них: 3 – в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК, и 8 – в других изданиях.

Подано 2 заявки на получение патента на полезную модель.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновываются актуальность темы диссертации, ее научная новизна, цель и задачи исследования, дается общая характеристика выполненных исследований, приводятся основные положения работы, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ особенностей пуска дизелей в условиях низких температур окружающего воздуха и способов облегчения пуска.

Пуск холодного дизеля представляет трудности вследствие:

- низкой температуры воздушного заряда;
- ухудшения условий распыливания топлива в связи с изменением его вязкости;
- повышенного сопротивления проворачиванию коленчатого вала и перемещению других, кинематически связанных с ним, деталей (поршни, детали механизма газораспределения и т.п.) из-за увеличенной вязкости масла;
- усиленной теплоотдачи в стенки цилиндра;
- потери части воздушного заряда.

В результате анализа специальной литературы выявлена необходимость повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива, например, с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур. Определены требования, предъявляемые к системам топливоподачи дизелей.

Исследованием процессов, происходящих в СВЧ камерах, проектированием СВЧ технологических установок, а также математическим моделированием электромагнитных и тепловых полей при нагреве СВЧ диэлектрических сред занимаются следующие ученые в России и за рубежом: Архангельский Ю.С., Балакирев В.А., Бецкий О.В., Бородин И.Ф., Воскресенский Д.И., Даутов О.Ш., Диденко А.Н., Девяткин И.И., Девятков Н.Д., Килькеев Р.Ш., Кислицын А.А., Кравченко В.Ф., Матисон В.А., Морозов Г.А., Насыров Н.М., Неганов В.А., Некрасов Л.Б., Некрутман С.В., Нигматуллин Р.И. и Окресс Э. Однако определение и выбор параметров СВЧ излучения для дизелей с неразделенными камерами сгорания требует дополнительного изучения.

Распыливание топлива ухудшается с повышением вязкости за счет образования крупных капель, несмотря на увеличение глубины их проникновения в среду сжатого воздуха. При малой вязкости процесс смесеобразования также ухудшается из-за снижения скорости проникновения капель топлива в камеру сгорания, в результате чего топливовоздушная смесь является неоднородной. Оптимальная вязкость дизельного топлива с точки зрения распыливания и прокачиваемости – 3 ... 8 мм²/с при 20°С. Поскольку в системе питания дизельное топливо служит одновременно смазывающей жидкостью, то использование топлива с вязкостью меньше указанных значений недопустимо.

Вторая глава посвящена уточнению математической модели для оценки качества смесеобразования топлива, нагретого СВЧ энергией. Математическая модель включает систему уравнений, представленных ниже.

В частности, предложена зависимость изменения температуры ΔT топлива в трубопроводе высокого давления при сжатии:

$$\Delta T = \frac{v}{C_p} (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) \left(\frac{1 - (k_1 Q - k_2 Q^2)}{k_1 Q - k_2 Q^2} + T \left(2,963 \cdot 10^{-3} - 3,035 \cdot 10^{-9} \frac{1}{v^2} \right) \right), \quad (1)$$

где v – удельный объем топлива; C_p – удельная теплоемкость топлива; $P_{\text{ВХ}}$, $P_{\text{ВЫХ}}$ – давление на входе и выходе из насоса; Q – подача насоса; k_1 , k_2 – коэффициенты теплопередачи; T – начальная температура топлива; v – скорость движения топлива.

К физическим свойствам топлива, оказывающим влияние на динамику топливной струи и мелкость распыливания при прочих равных условиях, относятся вязкость, поверхностное натяжение и плотность. При повышении вязкости возрастает дальнобойность топливной струи, что уменьшает долю объемного смесеобразования и приводит к попаданию на стенки камеры сгорания большего количества топлива. С понижением вязкости средний диаметр капель топлива уменьшается и распыливание становится более однородным. Однако при этом угол рассеивания топливной струи увеличивается, а дальнобойность ее уменьшается. Чем выше поверхностное натяжение, тем более устойчива капля к воздействию внешних сил и тем больше ее размеры. Чем меньше поверхностное натяжение, тем тоньше и однороднее распыливание топлива, что способствует ускорению процессов смесеобразования.

При разработке математической модели используются математические выражения и критериальные зависимости, предложенные Лышевским А.С. и уточненные Разлейцевым Н.Ф. применительно к быстроходным форсированным дизелям с камерами сгорания неразделенного типа.

В математических выражениях присутствуют такие физические параметры, как плотность топлива ρ_T , динамическая вязкость μ_T и поверхностное натяжение σ_T . Для зимнего дизельного топлива вышеуказанные параметры составляют: $\rho_T = 860 \text{ кг/м}^3$; $\mu_T = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\sigma_T = 28 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Согласно выражению (2) основным фактором, влияющим на границу между участками развития топливной струи, является динамическая вязкость топлива. Ее значение, в зависимости от теплового состояния, может изме-

няться в широком диапазоне в десятки раз, тогда как поверхностное натяжение изменяется лишь в 1,3-1,5 раза:

$$\frac{L_{T\Gamma}}{L_T} = \left[\frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{-0,05} \cdot \left[\frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{-0,65} \cdot \left[\frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{0,8}, \quad (2)$$

где: L_T – длина струи, ρ_T – плотность топлива, μ_T – динамическая вязкость; σ_T – коэффициент поверхностного натяжения; индекс Γ здесь и далее обозначает нагретое топливо.

Из выражения (3) следует, что по мере уменьшения $\rho_{T\Gamma}$, $\mu_{T\Gamma}$, $\sigma_{T\Gamma}$ по сравнению с аналогичными величинами для холодного дизельного топлива, уменьшается время прохождения топливной струей расстояния от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания. Это приводит к уменьшению количества испарившегося топлива в объеме камеры сгорания и оказывает влияние на динамику тепловыделения в начальной фазе процесса сгорания

$$\frac{\tau_{s\Gamma}}{\tau_s} = \left[\frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{0,37} \cdot \left[\frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{0,37} \cdot \left[\frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{-0,32}, \quad (3)$$

где: τ_s – время прохождения топливной струей расстояния от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания.

На диаметр капель оказывают влияние плотность, поверхностное натяжение и вязкость топлива (4). По мере уменьшения $\rho_{T\Gamma}$, $\mu_{T\Gamma}$ и $\sigma_{T\Gamma}$ средний диаметр капель уменьшается. При нагреве топлива средний диаметр капли топлива уменьшается в 1,6 раза (по сравнению с холодным дизельным топливом). Это положительно сказывается на пуске дизелей в условиях низких температур, т.к. более мелкие капли топлива быстрее испаряются, тем самым повышая долю объемного смесеобразования

$$\frac{d_{k\Gamma}}{d_k} = \left[\frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{0,4587} \cdot \left[\frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{0,1927} \cdot \left[\frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{0,1466}, \quad (4)$$

где: d_k – диаметр капель,

$$\frac{tg\left(\frac{\beta_{T\Gamma}}{2}\right)}{tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right)} = \left[\frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{-0,75} \cdot \left[\frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{-0,25} \cdot \left[\frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{-0,14}, \quad (5)$$

где: $tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right)$ – угол рассеяния топливной струи.

Из выражения (5) следует, что при впрыскивании в цилиндр дизелей подогретого топлива угол рассеивания топливной струи и ее боковая поверхность увеличиваются. Это приведет к увеличению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения, что также положительно ска-

жется на пуске дизелей в условиях низких температур в связи с увеличением доли объемного смесеобразования.

В **третьей главе** представлена методика проведения экспериментальных исследований по определению зависимости качества смесеобразования и пуска дизеля в условиях низких температур от параметров СВЧ энергии, используемой для нагрева топлива.

В соответствии с разработанной методикой экспериментальных исследований выполнена установка СВЧ источника для нагрева топлива на безмоторный стенд и на дизель; проведены экспериментальные исследования СВЧ нагрева дизельного топлива с целью выявления необходимого диапазона мощности источника и времени нагрева; определены параметры впрыскивания и распыливания топлива распылителем форсунки.

Первый этап безмоторных исследований включает определение оптимальных распределения диаметров капель и однородности распыливания топлива. Второй этап – моторные исследования имеют целью оценить эффективность применения СВЧ энергии для нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур.

Для нагрева и регистрации характеристик впрыскивания и распыливания топлива создана лабораторная экспериментальная установка СВЧ энергии, использованы стенд контроля качества распылителей на основе скоростной киносъемки для обработки изображения топливных струй и камера холода модели КХТ – 0,064/М.

Установка нагрева СВЧ топлива (рисунок 1) позволяет производить нагрев топлива до заданных температур. В ее состав входят: блок управления, высоковольтный источник питания, инвертор напряжения, магнетрон, камера нагрева, в роли которой выступает волновод прямоугольной формы, вентилятор охлаждения магнетрона.

Камера нагрева топлива представляет собой прямоугольный волновод размерами 845×300×20 мм. В волноводе размещается электрический магнетрон, который концентрирует электрическое поле вдоль силовых линий и осуществляет вывод СВЧ энергии. Питание установки СВЧ энергии осуществляется от сети 220 В переменного тока мощностью 1,5 кВт.

При анализе диапазона изменения параметров СВЧ установки велась регистрация температурных характеристик дизельного топлива. Экспериментальные данные фиксировались 4 датчиками температуры (термистор КМТ-1) в камере нагрева по методике, разработанной Афиногентовым В.И.

Для определения числовых значений характеристик впрыскивания и распыливания топлива распылителем форсунки использован стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки топливных струй. Общий вид стенда представлен на рисунке 2. Стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки изображения топливных струй является приставкой к стендам регулировки топливной аппаратуры (MOTORPAL, MIRKEZ и ДД – 1 – 03 и др.).

Стенд дополнительно оснащался пластиной из дюралюминия (толщиной 1,5 мм и размерами 120×140 мм), поверхность которой покрыта сажей и тонким слоем оксида магния для улавливания капель топлива при исследовании мелкости распыливания на режиме пуска. Толщина слоя сажи составляла 0,2...0,4 мм. Впрыскивание топлива на пластину производилось из распыли-

вающего отверстия распылителя с расстояния 250 мм. На одну пластину производилось улавливание капель топлива, поданного за одно впрыскивание. Результаты по мелкости распыливания струи топлива впоследствии осреднялись.

Исследования проводились со штатными форсункой и топливным насосом высокого давления дизеля КамАЗ. Кинорегистрация струи топлива осуществлялась скоростной кинокамерой СКС – 1М с частотой около 1000 кадров в секунду, что позволяло получать за время впрыскивания (от 20 мс до 25 мс) около 100 кадров. Кинорегистрация велась на киноплёнку, по результатам обработки которой определялись максимальное продвижение L струи топлива и максимальная ширина струи.

Методика эксперимента позволила определить оптимальный состав и структуру системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива в соответствии с поставленными задачами; параметры характеристик впрыскивания и распыливания топлива; оценить влияние мощности устройства СВЧ нагрева топлива, температуры топлива, времени нагрева и их взаимодействия на средний диаметр капель топлива и степень однородности его распыливания.

В четвертой главе проведен анализ результатов исследований и технико-экономическая оценка эффективности применения способа повышения качества смесеобразования при пуске дизеля в условиях низких температур, выработаны рекомендации по его применению.

В процессе обработки данных, полученных при регистрации диаметра капель (рисунок 3) и распыливания топлива (рисунок 4) на первом этапе безмоторных исследований, построены зависимости диаметра капель от варьируемых факторов (рисунок 5).

В ходе исследования установлено, что наиболее существенное влияние на средний диаметр капель и однородность распыливания топлива оказывают мощность устройства СВЧ и время нагрева, а во вторую очередь – начальная температура топлива. С понижением начальной температуры топлива, определяемой температурой окружающего воздуха, за период нагрева до 20 – 30 с и снижением мощности СВЧ излучения до 0,5 кВт средний диаметр капель топлива уменьшается незначительно. Это связано с тем, что в начальный период практически отсутствует конвективный теплообмен в камере нагрева топлива.

В результате обработки данных, полученных при регистрации вероятности пуска дизеля в условиях низких температур на втором этапе моторных исследований, построена зависимость попыток пуска от варьируемых факторов (рисунок 6).

Пуск дизеля с разработанным способом повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний в условиях низких температур осуществляется поэтапно:

- запуск устройства СВЧ нагрева и работа его в соответствии с рекомендованным временем;
- непосредственно пуск дизеля.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить условия надежного пуска дизеля в зависимости от параметров распыливания топлива и определить наиболее эффективный способ по-

вышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур.

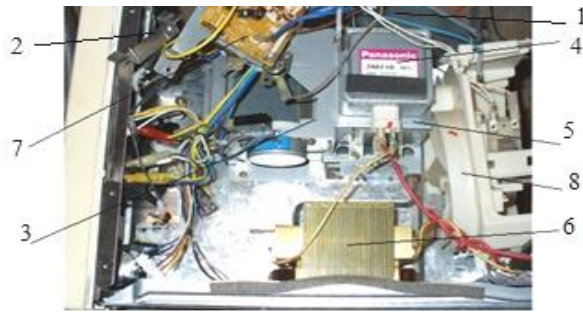


Рисунок 1. Установка устройства СВЧ энергии для нагрева топлива на дизель в автомобиле КамАЗ:

1 - топливный насос высокого давления; 2 - форсунка; 3 - волновод (камера нагрева дизельного топлива); 4 - магнетрон; 5 - инвертор напряжения; 6- трансформатор; 7 - блок управления; 8 - источник питания.

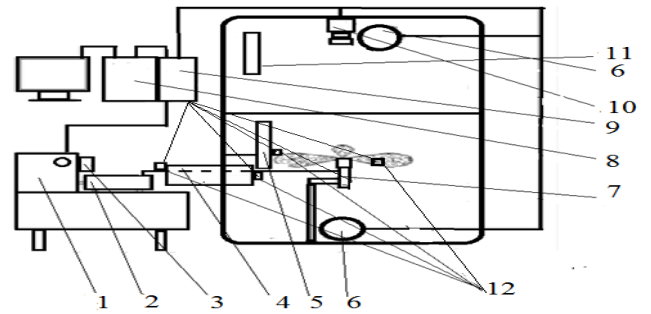


Рисунок 2. Стенд контроля качества распыливания топлива со скоростной киносъемкой:

1 - топливный стенд; 2 - ТНВД; 3 - оптический датчик вращения; 4 – трубопровод высокого давления; 5 - закопченная пластинка; 6 - блок освещения; 7 - форсунка; 8 - управляющая ЭВМ; 9 - блок синхронизации (СИНХРО-М); 10 - камера СКС-1М; 11 - термометр; 12 - термопары.

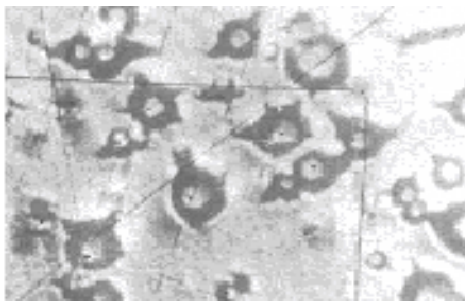


Рисунок 3. Частиц на пластине: температура топлива 10°C, диаметр до 60 мкм

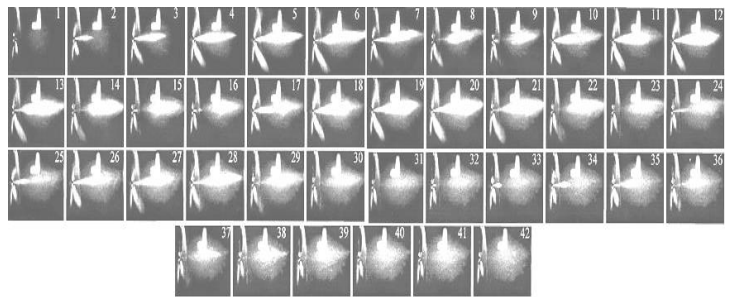


Рисунок 4. Кинограммы распыливания топлива распылителем форсунки: температура топлива 10°C

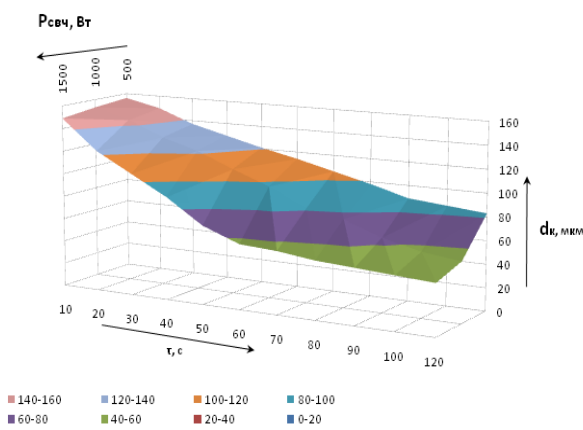


Рисунок 5. Зависимость диаметра капель топлива d_k от мощности $P_{свч}$ и времени τ воздействия СВЧ источника при температуре окружающей среды $t - \text{минус } 35^\circ\text{C}$

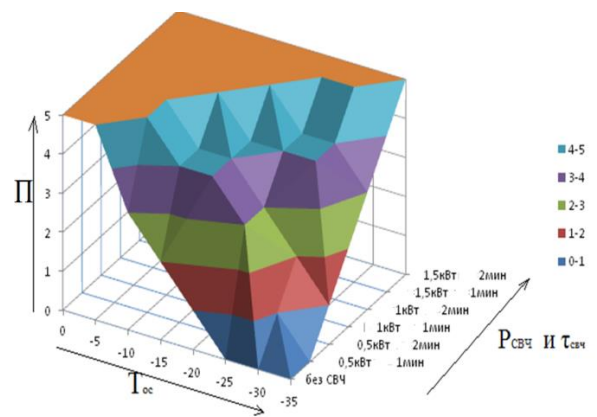


Рисунок 6. Зависимость количества попыток пуска дизеля от температуры окружающей среды, мощности и времени воздействия СВЧ источника

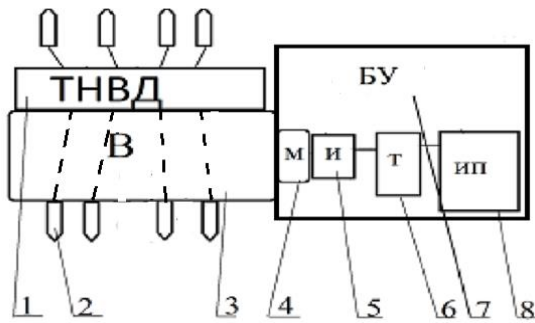


Рисунок 7. Структура системы топливоподачи с использованием устройства СВЧ нагрева топлива: 1 - топливный насос высокого давления; 2 – форсунка; 3 - волновод (камера нагрева дизельного топлива); 4 - магнетрон; 5 - инвертор напряжения; 6- трансформатор; 7 - блок управления; 8 - источник питания.

Структура системы топливоподачи с использованием устройства СВЧ нагрева топлива представлена на рисунке 7. Расчет стоимости системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива при условии серийного производства с учетом нормативного коэффициента экономической эффективности составит 450 рублей, годовой экономический эффект по экономии топлива за счет сокращения попыток пуска составляет приблизительно 1730 рублей на единицу техники.

Заключение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенные в работе, представляют собой научное обоснование разработанного технического решения по повышению качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ энергии при пуске дизелей в условиях низких температур. Выполненная работа позволяет сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Анализ особенностей процесса пуска дизелей в условиях низких температур окружающего воздуха и способов облегчения пуска показал:

– известные способы облегчения пуска не в полной мере удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 54120-2010 при нижнем пределе температуры окружающей среды минус 50 °С;

– обоснована возможность применения СВЧ энергии в системах топливоподачи для нагрева топлива в трубопроводе высокого давления перед впрыскиванием при пуске дизелей в условиях низких температур (от минус 35 °С до минус 50 °С).

2. Разработан способ повышения качества смесеобразования с использованием СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур (от минус 35 °С до минус 50 °С), обоснованы состав и структура системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива перед впрыскиванием в трубопроводе высокого давления.

3. Уточнена математическая модель для оценки качества смесеобразования топлива при использовании СВЧ энергии с учетом движения топлива в трубопроводе и коэффициента теплопередачи от трубопровода высокого давления к топливу и далее к наименее нагретым элементам системы. Разработана методика, позволяющая учесть изменение основных параметров распыливания ($d_{кГ}$, $L_{ТГ}$, $\tau_{сГ}$, $tg \beta_{ТГ}$) в зависимости от температуры (ΔT) топлива, при использовании СВЧ энергии для его нагрева;

4. Разработана методика экспериментальных исследований, которая позволила:

- подтвердить теоретические положения по повышению качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур (от минус 35 °С до минус 50 °С);

- разработать лабораторную установку СВЧ нагрева топлива для проведения экспериментальных исследований с изменением мощности СВЧ от 0,5 кВт до 1,5 кВт, времени нагрева топлива от 10 с до 120 с и начальной температуры топлива от 0 °С до минус 50 °С;

- провести проверку адекватности регрессионных моделей экспериментальных данных по критерию Фишера и обеспечить удовлетворительную сходимость на уровне доверительной вероятности 0,95.

5. Анализ результатов экспериментальных исследований показал:

- с понижением начальной температуры топлива, определяемой температурой окружающего воздуха, в период нагрева топлива до 20 – 30 с, и снижением мощности СВЧ источника до 0,5 кВт средний диаметр капель топлива практически не меняется;

- с ростом температуры топлива средний диаметр капель топлива уменьшается до 40 мкм при мощности СВЧ источника 1,5 кВт и времени нагрева около 120 с. При этом уже после 60 с нагрева средний диаметр капель топлива находится в зоне оптимальных значений от 40 мкм до 60 мкм;

- при температуре окружающей среды минус 35 °С вероятность пуска дизеля с помощью разработанного способа при мощности СВЧ колебаний 1,5 кВт и времени воздействия 60 с составляет 80 %.

6. Экономическая оценка разработанного способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля в условиях низких температур показала, что годовой экономический эффект по экономии топлива за счет сокращения попыток пуска составляет 1730 рублей на единицу техники.

7. Анализ результатов исследований применения способа повышения качества смесеобразования при пуске дизеля в условиях низких температур позволил рекомендовать следующие параметры элементов СВЧ устройства:

- съемный волновод необходимо выполнять в виде прямоугольного сечения, состоящим из двух половин, и располагать так, чтобы трубопровод высокого давления проходил внутри него;

- магнетроны СВЧ излучения можно применять мощностью не менее 1,5 кВт, например, фирмы Samsung.

8. Устройство СВЧ нагрева топлива можно использовать как отдельно, так и совместно со средствами предпусковой подготовки при температурах окружающей среды от 0 до минус 50 °С :

- при температурах окружающей среды от 0 °С до минус 10 °С устройство СВЧ нагрева топлива можно использовать без средств предпусковой подготовки. При этом мощность СВЧ источника может составлять 0,5 кВт и время воздействия СВЧ – 60 с ;

– при температурах окружающей среды от минус 10°C до минус 20°C устройство СВЧ нагрева топлива целесообразно использовать совместно с ЭФУ (мощность СВЧ – 1 кВт и время воздействия СВЧ – 60 с);

– при температурах окружающей среды от минус 20°C до минус 35°C устройство СВЧ нагрева топлива целесообразно использовать с электрофакельным устройством и устройствами подогрева моторного масла (мощность СВЧ – 1,5 кВт и время воздействия СВЧ – 60 с);

– при температурах окружающей среды от минус 35°C до минус 55°C устройство СВЧ нагрева топлива целесообразно использовать совместно с средствами предпусковой подготовки (мощность СВЧ – 1,5 кВт и время воздействия СВЧ – от 60 с до 120 с);

9. Основными факторами, обеспечивающими высокое качество смесеобразования топлива СВЧ энергией, являются:

– динамическая вязкость, в требуемом диапазоне достигаемая подогревом топлива при мощности СВЧ 1,5 кВт и времени воздействия СВЧ 60 с;

– плотность и поверхностное натяжение топлива, которые уменьшаются при подогреве СВЧ мощностью от 0,5 до 1,5 кВт и времени воздействия от 60 с до 120 с, тем самым уменьшая время достижения топливной струны стенки камеры сгорания;

– угол рассеивания топливной струи и ее боковая поверхность, которые увеличиваются при впрыскивании топлива, нагретого на 10°C при мощности СВЧ от 0,5 до 1,5 кВт и времени воздействия от 60 с до 120 с, и обеспечивают повышение доли объемного смесеобразования, что положительно сказывается на пуске дизеля в условиях низких температур;

– диаметр капель, который уменьшается при нагреве топлива СВЧ излучением от минус 35°C до 10°C в 1,6 раза, что положительно сказывается при пуске дизеля в условиях низких температур;

– время СВЧ нагрева топлива для обеспечения пуска дизеля МТ типа КамАЗ-740 должно составлять не менее 60 с, мощность СВЧ – не менее 1,5 кВт.

10. В целях уменьшения помех, вызываемых работой магнетрона, необходимо разместить корпус установки и высоковольтных соединений в экране, наполненным уретаном, силиконом, нитрилом или неопреном.

Дальнейшее развитие темы, которой посвящена настоящая диссертация, заключается в разработке устройств СВЧ повышенной мощности с обеспечением регулирования не только температуры топлива, но и температуры охлаждающей жидкости и смазочного масла дизеля при подготовке к запуску.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

– в изданиях, входящих в «Перечень ВАК», и приравненных к ним

1. **Смолин, А.А.** Комбинированные силовые установки для городского автомобиля / А.А. Смолин, В.В. Руднев, М.Л. Хасанова // Вестник Академии военных наук. Вып. №1(30). – М., 2010. – С.168–178.

2. **Смолин, А.А.** Комбинированные силовые установки для городского автомобиля / А.А.Смолин, В.В. Руднев, М.Л. Хасанова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – НГАВТ. – Вып №1. – Новосибирск, 2010. – С. 149–153.

3. **Смолин, А.А.** Использование СВЧ – нагрева топлива для обеспечения ускоренного и надежного пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха / А.А. Смолин, В.И. Денисенко // Вестник Академии военных наук. Вып. № 4 (45). – М., 2013.– С.190–192.

– в других изданиях

4. **Смолин, А.А.** Исследования взаимовлияния параметров топливной аппаратуры на величину топливоподачи дизелей / А.А. Смолин, В.В. Кольб, В.И. Денисенко // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. Вып. №15. – М., 2012. – С.98–101.

5. **Смолин, А.А.** Влияние топлива на надежный пуск дизеля в условиях низких температур /А.А. Смолин, Д.Ю. Фадеев// Материалы 9-й Международной научно-практической конференции «Научная индустрия европейского континента» Т. 28. – София, 2012. – С. 86–89.

6. **Смолин, А.А.** Влияния физических параметров топлива на угол рассеивания топливной струи и мелкость его распыливания /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной научно - практической конференции «Образование и наука без границ», Т. 35. – Прага, 2012. – С. 36–39.

7. **Смолин, А.А.** Влияние топлива на надежный пуск дизелей при низких температурах окружающего воздуха /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной научно - практической конференции «Перспективные вопросы мировой науки», Т. 39. – София, 2012.– С.74–77.

8. **Смолин, А.А.** Обеспечения надежного пуска двигателей при низких температурах /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной научно - практической конференции «Перспективные вопросы мировой науки» Т. 39. – София, 2012. – С.70 –74.

9. **Смолин, А.А.** Анализ параметров системы топливоподачи с установкой СВЧ нагрева топлива /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной технической научно - практической конференции «Научная индустрия европейского континента», Т. 25. – Прага, 2012. – С.27–31.

10. **Смолин, А.А.** Условия обеспечения надежного пуска двигателей /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной технической научно - практической конференции «Научная индустрия европейского континента», Т. 25. – Прага, 2012. – С.31–35.

11. **Смолин, А.А.** Оценка влияния физических параметров топлива на угол рассеивания топливной струи и мелкость его распыливания /А.А. Смолин // Материалы 8-й Международной технической научно - практической конференции «Научная индустрия европейского континента», Т. 25. – Прага, 2012. – С.35–39.