

**Омский автобронетанковый инженерный институт  
(филиал Военной академии материально-технического обеспечения  
Министерства обороны РФ)**

**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**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
РУДНЕВ В.В**

**Омск 2013**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ процессов пуска дизеля в условиях низких температур. Методы и устройства облегчения пуска.....	11
1.2 Влияние топлива на надежный пуск.....	18
1.3 Использование СВЧ нагрева топлива для обеспечения ускоренного и надежного пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха ...	22
1.4 Выводы по главе. Постановка задач исследования.....	25
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ С УСТРОЙСТВОМ СВЧ НАГРЕВА ТОПЛИВА.....	27
2.1 Физические свойства топлива.....	27
2.2 Математическое моделирование нагрева дизельного топлива в прямоугольном волноводе.....	31
2.3 Определение изменения температуры топлива при его продвижении в системе топливоподачи.....	39
2.4 Определение коэффициентов теплопередачи.....	43
2.5 Исследование характеристик впрыскивания и распыливания топлива на пусковых режимах .....	47
2.5.1 Влияние физических показателей топлива на показатели работы топ- ливной аппаратуры и параметры струи распыленного топли- ва.....	48
2.5.2 Расчет пути, проходимого топливной струей от распылителя до грани- цы между начальным и основным участками развития струи.....	50

2.5.3 Оценка относительного времени достижения струей топлива стенки камеры сгорания.....	53
2.5.4 Оценка влияния физических параметров топлива на мелкость его распыливания.....	54
2.5.5 Оценка влияния физических параметров топлива на угол рассеивания топливной струи.....	56
2.5.6 Определение изменения температуры топлива при его продвижении по системе топливоподачи.....	58
2.6 Выводы по главе.....	60
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>61</b>
3.1 Постановка цели и задач экспериментального исследования.....	61
3.2 Экспериментальная установка.....	62
3.3 Методика экспериментального исследования.....	73
3.4 Оценка погрешности измерений.....	87
3.5 Оценка адекватности математической модели.....	90
3.6 Выводы по главе.....	94
<b>ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>96</b>
4.1 Анализ параметров системы топливоподачи с установкой СВЧ - нагрева топлива.....	96
4.2 Способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур .....	101
4.3 Состав и структура системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива.....	104
4.4 Оценка технико-экономической эффективности способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур.....	106

4.5 Рекомендации по применению разработанного способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур.....	108
4.6. Выводы по главе .....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	129

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования мобильной техники (МТ) в условиях низких температур окружающей среды в значительной степени определяется возможностью подготовки к пуску силовой установки после продолжительной стоянки в этих условиях, агрегатов к движению и создания требуемого ГОСТом микроклимата в кабине (салоне) транспортного средства. Большое значение и достаточно широкое распространение в этой связи получили генераторы теплоты - пламенные подогреватели и отопители. Эти агрегаты позволяют решить отмеченные проблемы.

Актуальным вопросом в настоящее время является обеспечение надежного пуска дизеля МТ [9, 12-14, 29, 67, 76, 83, 88, 95, 97] в связи с преобладанием на территории Российской Федерации климатических зон с низкими зимними среднемесячными температурами (до минус 55 °С) [69].

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 35<sup>0</sup> до минус 50<sup>0</sup> С изучены недостаточно полно.

Пуск холодного дизеля представляет трудности вследствие [1, 40, 57, 63, 64, 67, 76, 83, 88, 95, 97]:

– 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.

Следовательно, необходимо выполнение мероприятий, позволяющих повысить не только энергетические и экономические показатели, но и обеспечить надежный пуск дизелей МТ в условиях климата с низкими температурами окружающего воздуха за минимально возможный временной интервал. Как показал анализ и ряд испытаний, существующие системы и устройства облегчения пуска не в полной мере удовлетворяют требованиям, которые к ним предъявляются, по времени подготовки к пуску, выходу на режим рабочей нагрузки, продолжительности работы средств облегчения пуска и предельным температурам пуска [9, 29, 39]. Решение данной задачи возможно при применении способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива перед впрыскиванием с помощью СВЧ энергии при пуске дизеля.

Используя СВЧ нагрев, при рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ энергии в тепловую, можно получить равномерное выделение тепла по объему тела. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорционально частоте колебаний и квадрату напряженности электрического поля. При этом следует отметить простоту подачи СВЧ энергии практически к любому участку нагреваемого тела.

Механизм нагрева материалов СВЧ энергией основан на явлении поляризации - перемещении в некоторых ограниченных пределах связанных электрических зарядов - диполей. Под действием внешнего переменного электромагнитного поля в материале происходит их колебательное движение и переориентация, в результате которых возникают токи проводимости и смещения. Совокупность обоих явлений и обеспечивает нагрев материала.

Преимущества СВЧ нагрева перед другими видами [45 – 60,]:

- тепловая безынерционность, т. е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. Отсюда высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость;

- принципиально высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел. Теоретическое значение этого КПД близко к 100 %. Тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными;

- 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 конференции «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.

**Объем и структура работы.** Диссертация содержит 136 страниц машинописного текста, 10 таблиц, 32 рисунка и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и приложений.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Анализ процессов пуска дизеля в условиях низких температур. Методы и устройства облегчения пуска

Пуск холодного двигателя затрудняется при температуре окружающего воздуха от минус 10 °С и ниже [40, 57, 63, 64, 67, 76, 83, 88, 95, 97].

Под надежным электростартерным пуском понимается пуск двигателя, оборудованного всеми навесными агрегатами, на основном топливе и при использовании заряженных на 75 % штатных аккумуляторных батарей не более чем за три попытки пуска. Продолжительность каждой попытки не должна превышать для дизелей 15-20 с. Интервалы между попытками устанавливаются 1-1,5 мин [57, 63, 64, 67, 76].

Выделяют четыре стадии электростартерного пуска поршневых двигателей [39, 63, 64, 119]:

1-я – частота вращения коленвала увеличивается до средней частоты вращения в установившемся режиме. Продолжительность этой стадии зависит от вязкости применяемого масла, мощности электростартера, момента инерции системы «стартер – двигатель» и обычно не превышает десятых долей секунды;

2-я – наступает равенство средних значений вращающего момента электродвигателя и момента сопротивления при постоянной средней частоте вращения коленвала. В условиях низкотемпературного пуска на этой стадии начинается воспламенение топлива;

3-я – двигатель начинает развивать мощность за счет теплоты сгорания топлива;

4-я – двигатель работает самостоятельно.

Пусковые качества дизелей оценивают по минимальной температуре надежного пуска, времени подготовки двигателя к принятию нагрузки, минимальной пусковой частоте  $n_{min}$  и условной величиной - средним давлением трения  $P_{тр}$  (отношение силы трения к площади поршня) [1, 57, 63, 64, 67, 76].

Минимальная температура надежного пуска - наиболее низкая температура окружающего воздуха, при которой возможен надежный пуск двигателя. При этом температура узлов и деталей двигателя, охлаждающей жидкости и моторного масла не должна отличаться от температуры окружающего воздуха более чем на 1 °С.

При отрицательной температуре окружающего воздуха динамика пуска дизеля усложняется (рисунок 1.1).

Пуск холодного дизеля представляет трудности вследствие [29, 63, 64,]:

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

Низкая температура воздушного заряда на впуске и усиленный теплоотвод в стенки цилиндра приводят к тому, что значительно снижаются температура и давление рабочего тела в конце такта сжатия. Существенное влияние на уменьшение температуры воздуха в конце такта сжатия оказывает и неравномерность скорости движения поршня в цилиндре. Наименьшее значение скорости приходится на конец такта сжатия. В результате увеличивается не только время, отводимое на процесс теплообмена между воздушным зарядом и стенками камеры сгорания, но и перепад температур между ними, поэтому потери тепла воздушным зарядом возрастают. При числе оборотов  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ , при температуре окружающего воздуха минус 40 °С и холодных стенках цилиндра в дизелях температура конца сжатия составляет всего 137 - 177 °С [63, 64,].

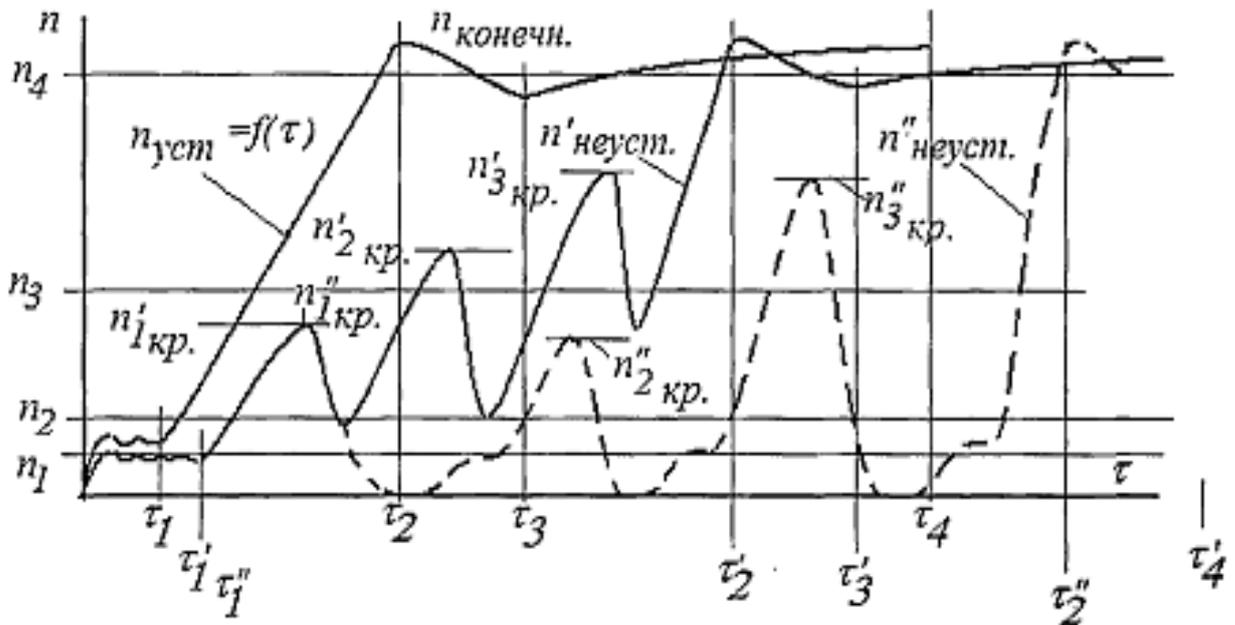


Рисунок 1.1 – Схема протекания устойчивого и неустойчивых пусков:

$n_{уст} = f(\tau)$ ,  $n'_{неуст} = f(\tau)$ ,  $n''_{неуст} = f(\tau)$  - характеристики устойчивого и неустойчивых пусков в функции от времени:  $\tau_1$ ,  $\tau_1'$ ,  $\tau_1''$  - время прокрутки вала пусковым средством соответственно при устойчивом (прогретый двигатель) и неустойчивом (холодном) пусках;  $\tau_1 - \tau_2$ ,  $\tau_1' - \tau_2'$ ,  $\tau_1'' - \tau_2''$  - время разгонов на топливе до вступления в действие регулятора частоты вращения (рейка находилась на упоре максимальной подачи);  $\tau_2 - \tau_3$ ,  $\tau_2' - \tau_3'$ ,  $\tau_2'' - \tau_3''$  - разгоны на топливе с одновременным уменьшением подачи топлива регулятором до положения холостого хода или иного заданного режима;  $\tau_3 - \tau_4$ ,  $\tau_3' - \tau_4'$ ,  $\tau_3'' - \tau_4''$  - прогрев дизеля с относительно малым изменением скоростного режима и параметров рабочего процесса;  $n'_{1кр}$ ,  $n'_{2кр}$ ,  $n'_{3кр}$ ,  $n''_{1кр}$ ,  $n''_{2кр}$ ,  $n''_{3кр}$  - критические частоты вращения при неустойчивых пусках;  $n_1$ ,  $n_2$  - диапазон пусковых частот;  $n_3$  - частота выключения пускового средства;  $n_4$  - частота срабатывания регулятора.

Снижение скорости движения поршня и увеличенные зазоры в цилиндро-поршневой группе ведут к потерям воздушного заряда, перетекающего через за-

зоры в картер, что приводит к снижению давления воздуха в конце такта сжатия и соответствующему снижению температуры [63, 64,].

Величину утечек рабочего тепла в процессе сжатия оценивают коэффициентом сохранения заряда  $\xi$ , введенным по результатам исследований, проведенных НПО «Автоэлектроника» [3, 4], определяемым отношением

$$\xi = \frac{m_c}{m_a}, \quad (1.1)$$

где  $m_c$  – масса заряда воздуха в ВМТ, кг;

$m_a$  – масса заряда воздуха в момент закрытия клапана, кг.

На пусковых режимах скорость потока воздуха на впуске мала, и запаздывание закрытия впускного клапана после НМТ приводит к обратному выбросу части воздушного заряда и потере части хода поршня [64]. Ее оценивают коэффициентом потерянного объема  $\Psi$ :

$$\psi = \frac{\Delta V_h}{V_h}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta V_h$  – объем цилиндра, описываемый поршнем при ходе от НМТ до момента открытия впускного клапана, л;

$V_h$  – рабочий объем, л.

Давление воздуха в конце такта сжатия при пуске холодного двигателя может составлять до 75 % номинальной величины [4].

Низкая температура окружающего воздуха отрицательно сказывается и на качестве распыливания топлива форсунками, что также затрудняет пуск дизеля [5, 7]. Происходит это из-за повышения вязкости дизельного топлива и возрастания сил его поверхностного натяжения, уменьшения частоты вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления и скорости плунжеров нагнетательных секций, что ведет к снижению давления нагнетаемого в форсунки топлива и соответствующему уменьшению подъема иглы форсунки. В результате образуется меньший зазор между седлом и запорной частью иглы распылителя и возрастает сопротивление впрыску, что уменьшает скорость истечения топлива из распылителя. Происходящее при этом снижение качества распыливания топлива в сочета-

нии со снижением температуры воздуха в конце такта сжатия увеличивают период задержки самовоспламенения топлива, затрудняя пуск дизеля. Иногда сочетание этих факторов вообще не обеспечивает самовоспламенения дизельного топлива, и пуск дизеля становится невозможным. Практикой установлено, что надежный пуск дизелей по условиям воспламеняемости и прокачиваемости топлива можно произвести при температуре окружающего воздуха не ниже минус 15°C. При более низких температурах необходимо применять средства облегчения пуска дизеля.

Существуют следующие методы облегчения пуска двигателя в условиях низких температур окружающего воздуха [40, 57, 63, 64, 67, 76, 83, 88]:

- применение моторных масел с низкой вязкостью. Недостатком этого метода является то, что при температурах ниже минус 35 °С практически все масла замерзают;

- разогрев двигателя с использованием горячей воды, заливаемой в систему охлаждения. К недостаткам этого метода является его большая продолжительность по времени (до 5 мин.) и необходимость наличия источника горячей воды;

- подогрев масла в картере двигателя с помощью нагревателей различного типа. К недостаткам этого метода также относят большую продолжительность по времени (в зависимости от температуры окружающего воздуха – до 60 мин.), наличие дополнительных источников питания и наличие специального оборудования;

- пуск двигателя буксированием. Недостатки этого метода заключаются в следующем: ходовая часть, трансмиссия и двигатель испытывают большие ударные нагрузки, которые могут привести к поломкам, а также отмечается значительная продолжительность по времени (на организацию буксирования уходит от 2 до 3 мин), возможность проведения буксирования может быть ограничена по месту;

- использование средств, облегчающих пуск двигателя в условиях низких температур.

Средства, облегчающие пуск дизеля в условиях низких температур, воздействуя на отдельные системы двигателя, температурное состояние его деталей и эксплуатационных материалов, снижают моменты сопротивления вращению коленчатого вала, улучшают условия образования и воспламенения топливовоздушной смеси. Эффективность различных методов и устройств для облегчения пуска зависит от типа двигателя, его конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

К средствам облегчения пуска дизеля предъявляются следующие требования [29]:

- обеспечение высокой эффективности пуска (низкое значение предельной температуры, минимальное время, небольшая величина минимальной пусковой частоты вращения коленчатого вала);
- подготовка автомобиля к движению в минимальные короткие сроки;
- потребление минимального количества электрической энергии АКБ;
- обеспечение пуска двигателя с использованием эксплуатационных материалов, рекомендованных заводом - изготовителем;
- исключение больших износов деталей при пусках;
- снижение жесткости работы дизеля;
- обеспечение работоспособности в условиях пурги, пониженного атмосферного давления;
- сохранение работоспособности в летний период без дополнительных мер по консервации;
- простота конструкции и обслуживания;
- долговечность;
- выполнение требований пожарной безопасности.

Анализ литературных и патентных источников показывает, что основными вспомогательными средствами облегчения холодного пуска дизелей в настоящее время являются [9, 29, 40, 57, 63, 64, 67, 76, 83, 88]:

- пуск дизелей при использовании свечей накаливания обеспечивается до температур минус 10 - 15 °С при частоте вращения коленчатого вала 60 - 80

мин<sup>-1</sup>. Из-за потери теплоты при большой длине трубопровода снижается эффективность работы свечей подогрева в условиях низких температур. Поэтому их используют на дизелях с малыми рабочими объёмами (до 4,5 л), пуск которых должен обеспечиваться до температур минус 12 - 17 °С;

- электрофакельные подогреватели воздуха во впускном трубопроводе, что в сочетании с маловязким моторным маслом позволяет снизить минимальную температуру пуска холодного дизеля на 10-15 °С;

- пусковые приспособления с использованием легковоспламеняющихся жидкостей могут привести к повышенным пусковым износам деталей дизеля, кроме того, необходимо специальное обучение водителей, наличие громоздких баллонов с легковоспламеняющейся жидкостью, что в случае повреждения приводит к возгоранию, не позволяет использовать эти устройства на МТ;

- электрические подогреватели, используемые для подогрева жидкости в системе охлаждения двигателя, масла в картере, топлива в топливной системе и электролита аккумуляторной батареи. По способу превращения электрической энергии в тепловую их подразделяют на нагреватели индукционные, полупроводниковые, электродные, сопротивлений, инфракрасные, излучатели и т. д. Наибольшее распространение получили нагреватели сопротивлений, однако все большее внимание уделяется полупроводниковым подогревателям;

- использование ТЭНов. Питание ТЭНов в основном от сети переменного тока напряжением 220 В и реже от бортового напряжения 24 В. Количество ТЭНов подбирается таким образом, чтобы обеспечить прогрев дизельного двигателя до пусковых температур за 20-30 мин. При этом потребляемая мощность ТЭНов не должна превышать 1000 Вт;

- индивидуальные предпусковые подогреватели. Подогрев картерного масла, блока цилиндров и подшипников коленчатого вала перед пуском позволяет уменьшить вязкость моторного масла, облегчить его прокачиваемость по смазочной системе и тем самым уменьшить момент сопротивления вращению и износ деталей двигателя при пуске. С другой стороны, подогрев головки и стенок блока цилиндров и впускного трубопровода улучшает условия смесеобразования и вос-

пламенения топлива и способствует снижению минимальной пусковой частоты вращения. Время работы подогревателей в зависимости от температуры окружающего воздуха составляет до 30 мин;

- системы пуска дизеля с использованием сжатого воздуха, которые на МТ используются как вспомогательные. К недостаткам указанной системы относят: ограниченный запас энергии, которого хватает на 10 - 20 пусков; возможность утечки воздуха через неплотности, а также в результате повреждений осколками баллонов со сжатым воздухом; усложнение конструкции двигателя; переохлаждение стенок цилиндров и камер сгорания при расширении вводимого в них сжатого воздуха; трудность размещения пусковых клапанов при малых размерах цилиндров; коррозию деталей двигателя при влажном воздухе.

Как показал анализ и ряд испытаний, проведенных в 21 НИИ АТ, существующие системы и устройства облегчения пуска не в полной мере удовлетворяют требованиям, которые к ним предъявляются по времени подготовки к пуску, выходу на режим рабочей нагрузки, продолжительности работы средств облегчения пуска и предельным температурам пуска [9].

## **1.2 Влияние топлива на надежный пуск**

Низкая температура окружающего воздуха отрицательно сказывается на качестве распыливания топлива форсунками, что затрудняет пуск дизеля [9, 40, 57, 63, 64, 67, 76, 83, 88]. Происходит это из-за повышения вязкости дизельного топлива и возрастания сил его поверхностного натяжения, уменьшения частоты вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления и скорости плунжеров нагнетательных секций, что ведет к снижению давления нагнетаемого в форсунки топлива и соответствующему уменьшению подъема иглы форсунки. В результате образуется меньший зазор между седлом и запорной частью иглы рас-

пылителя и возрастает сопротивление впрыску, что уменьшает скорость истечения топлива из распылителя. Происходящее при этом снижение качества распыливания топлива в сочетании со снижением температуры воздуха в конце такта сжатия увеличивают период задержки самовоспламенения топлива, затрудняя пуск дизеля. Иногда сочетание этих факторов вообще не обеспечивает самовоспламенения дизельного топлива, и пуск дизеля становится невозможным. Практикой установлено, что надежный пуск дизелей по условиям воспламеняемости и прокачиваемости топлива можно произвести при температуре окружающего воздуха не ниже минус 15 °С. При более низких температурах необходимо применять средства облегчения пуска дизеля.

С изменением давления впрыска меняется скорость потока в сопловом канале форсунки, а следовательно, меняется и степень его завихренности. С увеличением давления размеры капель топлива уменьшаются [9].

В ходе исследований установлено заметное влияние вязкости топлива на степень распыливания [12, 13, 14].

Эта зависимость может быть выражена посредством формулы [6]:

$$\frac{d}{d_{исх}} = \left( \frac{\nu}{\nu_{исх}} \right)^{0,15}, \quad (1.3)$$

где  $d$  – средний диаметр капель при кинематической вязкости  $\nu$ ;  $d_{исх}$  – известный средний диаметр капель при кинематической вязкости  $\nu_{исх}$ .

При увеличении плотности среды наблюдаются уменьшение диаметра наиболее мелких капель и увеличение диаметра наиболее крупных капель [6].

Мелкость распыливаемого топлива, подаваемого в цилиндр двигателя, в течение первого периода впрыска влияет на предпламенные процессы и на протекание цикла, на втором этапе происходит процесс горения основной массы топлива, в случае ухудшения процесса дробления струи на третьем этапе с уменьшением давления впрыска в камеру может попасть почти не распавшаяся струя [13].

Оценку качества распыливания топлива проводят двумя методами [4]: методом оценки совокупности капель по осредненным критериям и методом, позволяющим установить количество капель определенного размера.

При создании и разработке математической модели смесеобразования и сгорания жидких углеводородных топлив используются математические выражения и критериальные зависимости, предложенные А.С. Лышевским и уточненные Н.Ф. Разлейцевым применительно к быстроходным форсированным дизелям [52, 72].

Рассмотрим математические выражения, по которым определяются характеристика впрыскивания топлива и критериальные зависимости.

Средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива:

$$U_0 = \frac{B_{ц}}{mf_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}}, \quad (1.4)$$

где  $B_{ц}$  – цикловая порция топлива;

$mf_c$  – площадь эффективного проходного сечения распыливающих отверстий;

$i$  – количество распыливающих отверстий;

$\rho_T$  – плотность топлива;

$t_{впр}$  – продолжительность впрыскивания порции топлива.

Оценка влияния физических параметров топлива на мелкость его распыливания осуществляется с помощью критериального уравнения для отыскания средних диаметров капель топливной струи:

$$d_k = E_k \cdot d_c (\rho \cdot W_e)^{-0,265} \cdot M^{0,0733}, \quad (1.5)$$

где  $d_k$  – средний диаметр капель топливной струи;

$E_k$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции форсунки и способа осреднения размеров капель;

$d_c$  – диаметр струи;

$\rho$  – критерий, характеризующий отношение плотности воздуха и топлива;

$W_e$  – критерий Вебера, характеризующий отношение сил поверхностного натяжения и сил инерции;

$M$  – критерий, характеризующий отношение сил поверхностного натяжения и вязкости.

Пусковые качества дизельного двигателя в значительной степени зависят от угла опережения впрыскивания  $\theta$  и величины цикловой подачи топлива (весовой

$g_u$  или объемной  $q_u$ ) [52, 72]. Для большинства отечественных дизелей оптимальные установочные углы опережений впрыска топлива при пуске лежат в пределах от 16 до 22° угла поворота коленчатого вала до ВМТ. При пуске холодного дизельного двигателя цикловая подача топлива  $g_u$  должна быть больше, чем на режиме максимальной мощности. Повышение  $g_u$  улучшает условия воспламенения, увеличивает индикаторный момент дизельного двигателя на режимах разгона и уменьшает общую продолжительность пуска. Величина  $g_u$  должна составлять 100-120 мг на литр рабочего объема цилиндра [11].

Влияние цикловой подачи и угла опережения впрыскивания показаны на рисунке 1.2.

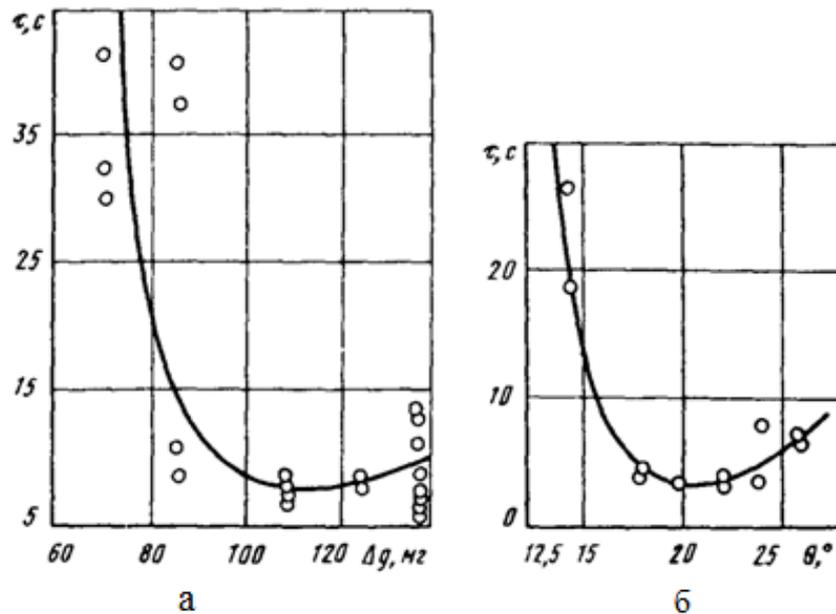


Рисунок 1.2 – Влияние параметров топливоподачи на пуск дизеля:

а – влияние цикловой подачи на продолжительность пуска; б – влияние угла опережения впрыскивания на продолжительность пуска;  $\tau$  – продолжительность пуска;  $\Delta g$  – цикловая подача;  $\theta$  – угол опережения впрыскивания.

### **1.3 Использование СВЧ – нагрева топлива для обеспечения ускоренного и надежного пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха**

Как было указано выше, существующие на сегодняшний день методы облегчения пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха не удовлетворяют современным требованиям ведения боевых действий. Как нам представляется, использование СВЧ нагрева топлива и тепловой трубы для нагрева моторного масла позволит обеспечить надежный пуск дизеля в условиях низких температур.

В подавляющем большинстве случаев нагрев каких - либо физических тел производится путем передачи тепла снаружи внутрь за счет теплопроводности [24, 102].

Используя СВЧ нагрев, при рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ энергии в тепловую, можно получить равномерное выделение тепла по объему тела. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорционально частоте колебаний и квадрату напряженности электрического поля. При этом следует отметить простоту подачи СВЧ энергии практически к любому участку нагреваемого тела.

Механизм нагрева материалов СВЧ энергией основан на явлении поляризации - перемещении в некоторых ограниченных пределах связанных электрических зарядов - диполей. Под действием внешнего переменного электромагнитного поля в материале происходит их колебательное движение и переориентация, в результате чего возникают токи проводимости и смещения. Совокупность обоих явлений и обеспечивает нагрев материала.

Удельная активная мощность, определяющая количество тепла, выделенного при СВЧ - нагреве в единице объёма материала, рассчитывается согласно классическому закону Джоуля - Ленца по формуле:

$$P_{\text{уд}} = 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot tg\sigma \cdot f \cdot E^2 , \quad (1.6)$$

Длина волны СВЧ генератора (магнетрона) может быть выбрана из условия:

$$\lambda = (1 + 2)\pi \cdot l \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{1 + tg\sigma} - 1} , \quad (1.7)$$

где  $\lambda$  – длина волны;

$tg\sigma$  – тангенс угла диэлектрических потерь;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;

$l$  – толщина изделия.

Преимущества СВЧ нагрева перед другими видами [40]:

- тепловая безынерционность, т. е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. Отсюда высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость;

- принципиально высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел. Теоретическое значение этого КПД близко к 100 %. Тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными;

- возможность осуществления и практического применения новых необычных видов нагрева – избирательного, равномерного, сверхчистого.

Основным генератором СВЧ энергии является магнетрон (электровакуумный генератор электромагнитных СВЧ колебаний, основанный на взаимодействии электронов, движущихся в магнитном поле, с возбуждаемыми ими электромагнитными полями). Основу его конструкции составляет коаксиальный цилиндрический диод с внутренним электродом – катодом в однородном магнитостатическом поле, направленном вдоль его оси.

Для передачи энергии источника к приемнику используются как волноводные линии, так и свободное пространство. Волновод, по которому распространя-

ется волна, представляет собой трубку круглого или прямоугольного сечения. Наиболее применим на практике волновод прямоугольного сечения [6,17].

Генерируемая мощность поступает по волноводу (линия связи) в рабочую зону, представляющую собой камеру (рабочая камера).

В устройствах СВЧ нагрева находят применение резонаторные камеры в виде прямоугольных объемных резонаторов, линейные размеры которых в 5 - 6 раз превышают длину волны генератора. В подобном резонаторе может существовать несколько различных видов колебаний (более десяти), у каждого из которых свое распределение электрического и магнитного полей внутри объема резонатора. Такие резонаторы называются многомодовыми, т. е. в них может быть одновременно возбуждено несколько видов колебаний.

Размеры и параметры объемных резонаторов могут быть рассчитаны на ЭВМ и оптимизированы. Задача оптимизации состоит в том, чтобы выбрать такие размеры резонатора, при которых в нем можно было бы возбуждать только определенные виды колебаний, а интерференция между ними давала бы возможно более равномерное по объему поле. При этом возбуждающие колебания устройства должны устанавливать строго определенные соотношения между амплитудами тех видов колебаний, которые дают суммарное равномерное поле.

Существует несколько иной способ получения равномерности нагрева – это применение двух или более генераторов, работающих на разных, но обычно близких частотах, или введение изменения во времени генерируемой длины волны в некоторых возможных пределах  $\pm d\lambda$ .

Чем ближе по шкале длин волн расположены виды колебаний рассматриваемого многомодового резонатора, тем меньшее изменение длины волны генератора оказывается достаточным для улучшения равномерности нагрева и получения равномерного электромагнитного поля в нем даже при слабой нагрузке резонатора обрабатываемым диэлектриком.

Для СВЧ нагрева наиболее пригодны такие многомодовые резонаторы, у которых резонансные длины волн различных видов колебаний расположены по шкале длин волн не сгустками, а возможно более равномерно. Это получается, ко-

гда размеры резонатора соизмеримы, но не равны, т. е. когда резонатор представляет собой параллелепипед, близкий к кубу.

#### **1.4 Выводы по главе. Постановка задач исследования**

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Существующие методы и средства облегчения пуска не в полной мере удовлетворяют требованиям, которые к ним предъявляются: по времени подготовки к пуску, продолжительности работы средств облегчения пуска, температурным условиям, при которых они должны обеспечивать надежный пуск двигателя;

2. Проведенный анализ показал, что значительное влияние на физические свойства топлива оказывает его температура. На основании анализа существующих представлений о физике процессов, происходящих при СВЧ нагреве топлива, а также проведения предварительного эксперимента по реализации СВЧ нагрева дизельного топлива установлена принципиальная возможность реализации СВЧ нагрева в системах топливоподачи дизелей.

3. СВЧ излучение позволяет в течении непродолжительного времени осуществить равномерный нагрев топлива, необходимого на весь период осуществления пуска дизеля, тем самым способствуя сокращению времени на подготовку к пуску в условиях низких температур окружающего воздуха до 1 – 1,5 минуты;

В соответствии с выводами в работе необходимо решить 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.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ С УСТРОЙСТВОМ СВЧ НАГРЕВА ТОПЛИВА

### 2.1 Физические свойства топлива

Работа двигателей в условиях низких температур имеет ряд особенностей, обусловленных как непосредственным снижением температуры воздушного заряда, поступающего в двигатель, так и снижением его общего теплового состояния. На функционировании двигателя и его систем сказывается также изменение физических свойств топлива [27, 54, 77]. Изменение температуры топлива (рисунок 2.1) отражается на его кинематической вязкости  $\nu$ , поверхностном натяжении  $\sigma$ , коэффициенте сжимаемости  $\alpha_T$ , теплопроводности  $\lambda$ , плотности дизельного топлива  $\rho$  и его удельной теплоемкости  $C$ .

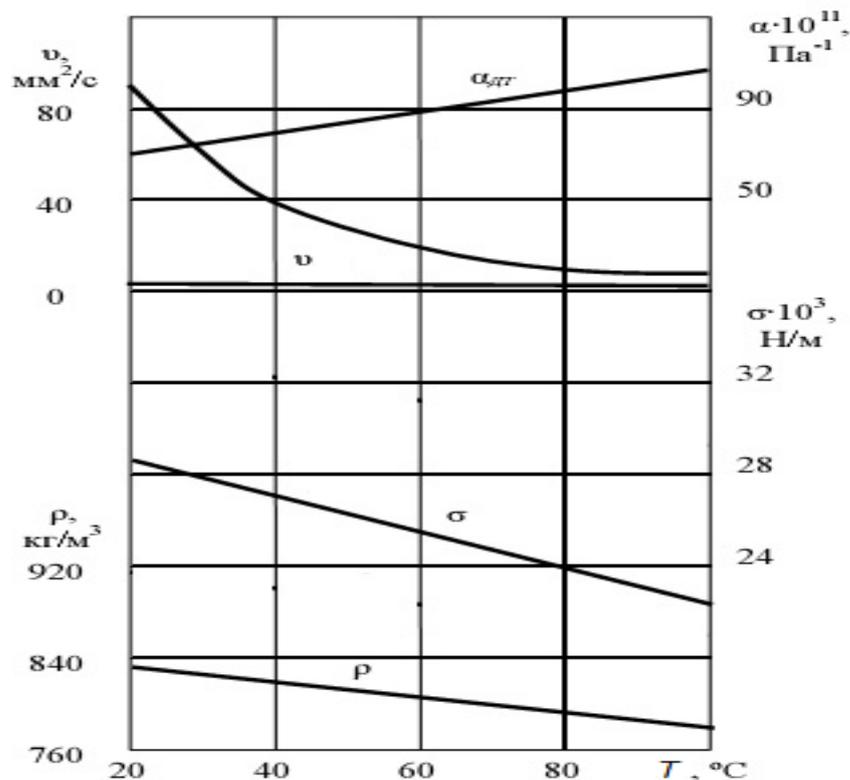


Рисунок 2.1 – Изменение физических свойств топлива в зависимости от его температуры

Именно эти показатели оказывают определенное влияние на протекание процессов впрыскивания, испарения, смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля, что в конечном итоге оказывает влияние на пуск дизеля.

Одно из важнейших требований к качеству дизельного топлива – легкая прокачиваемость при различных температурах окружающей среды [96]. Это качество определяется вязкостью и температурой застывания топлива. Вязкость дизельного топлива зависит от температуры (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Кинематическая вязкость дизельного топлива

Дизельное топливо	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при температуре, °С			
	плюс 20	0	минус 10	минус 20
Летнее	6,36	12,94	20,59	50,92
Зимнее	4,26	8,36	12,43	20,6

С повышением температуры топлива плотность, поверхностное натяжение и вязкость его уменьшаются, а коэффициент сжимаемости увеличивается.

Распыливание топлива ухудшается с повышением вязкости за счет образования крупных капель, хотя увеличивается глубина их проникновения в среду сжатого воздуха [19]. При малой вязкости процесс смесеобразования также ухудшается из-за снижения скорости проникновения капель топлива в камеру сгорания, в результате чего топливовоздушная смесь становится неоднородной [46]. Оптимальная вязкость дизельного топлива, с точки зрения распыливания и прокачиваемости, 3 - 8 мм<sup>2</sup>/с при 20 °С [53]. Поскольку для приборов системы питания дизельное топливо служит одновременно смазывающей жидкостью, то использование топлива с вязкостью меньше указанных значений недопустимо. В противном случае возрастает износ плунжерных пар, а также снижается коэффициент подачи топлива в камеру сгорания из-за увеличения утечек топлива через зазоры прецизионных пар. При повышении вязкости с 3 до 8 мм<sup>2</sup>/с коэффициент подачи топлива увеличивается на 15 - 16 % [96].

Удельная теплоемкость жидкости в значительной степени зависит от ее температуры. Для определения теплоемкости нефтепродуктов применяют следующую формулу [23]:

$$C = 2020 - 0.61 \cdot (T - 100), \quad (2.1)$$

где  $T$  – температура  $^{\circ}\text{C}$ , при которой измеряется теплоемкость.

Зависимость удельной теплоемкости от температуры жидкости имеет линейный характер и при увеличении температуры жидкости этот коэффициент увеличивается. Разница в коэффициенте теплоемкости в зависимости от вида топлива составит для одинаковых температурных условий 2,4 % [23]. Увеличение температуры топлива с минус 40 до 0  $^{\circ}\text{C}$  приведет к увеличению коэффициента теплоемкости на 3,34 %.

Теплопроводность  $\lambda_T$  также зависит от температуры дизельного топлива. У нефтепродуктов теплопроводность невелика и может быть определена по эмпирической формуле [23]:

$$\lambda_T = \frac{117}{\rho_{15}} (1 - 0.00054 \cdot T), \quad (2.2)$$

где  $\rho_{15}$  – плотность при температуре 15  $^{\circ}\text{C}$ .

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры жидкости имеет линейный характер, и при увеличении температуры жидкости этот коэффициент увеличивается [23].

Разница в коэффициенте теплопроводности в зависимости от вида топлива (его плотности) составит для одинаковых температурных условий 4,6%, а изменение температуры топлива от минус 40 до 0  $^{\circ}\text{C}$  приведет к изменению коэффициента теплопроводности на 1,1 % (рисунок 2.2).

Температура топлива в значительной степени оказывает влияние на его вязкость, особенно в области низких температур, где эта зависимость имеет резко выраженный степенной характер (рисунок 2.2).

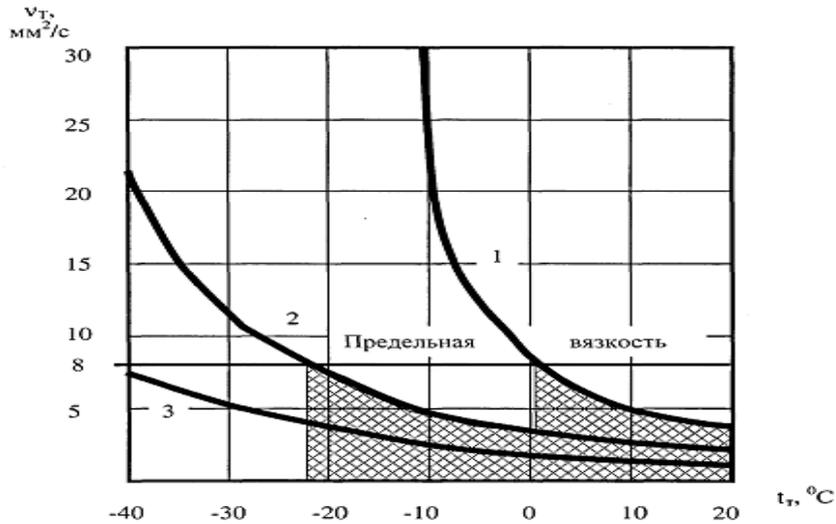


Рисунок 2.2 - Зависимость кинематической вязкости дизельного топлива от его температуры [50]: 1 - летнее (Л); 2 - зимнее (З); 3 - арктическое (А)

К физическим характеристикам топлива, оказывающим влияние на процессы его испарения и выгорания, можно отнести среднюю объемную температуру кипения по характеристикам разгонки топлива, критическую температуру и давление фазового перехода жидкого топлива в пар и др.

На рисунке 2.3 приведена кривая фракционной разгонки дизельного топлива.

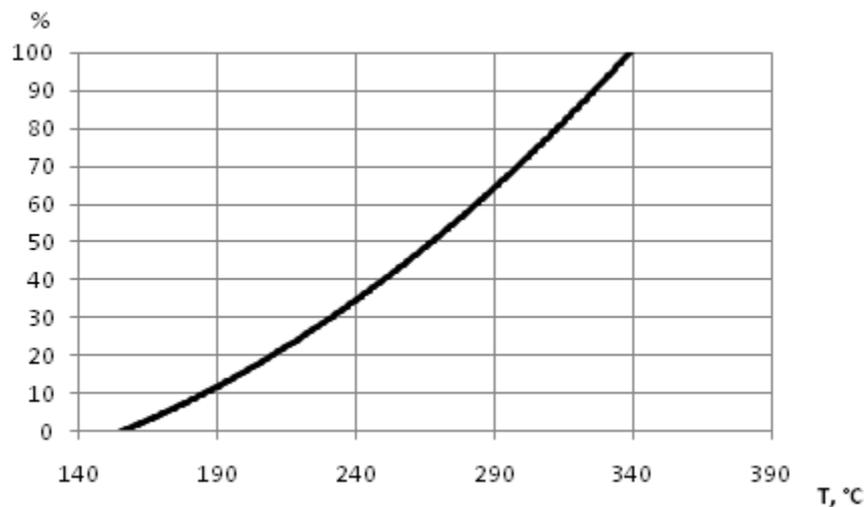


Рисунок 2.3 - Кривая фракционной разгонки дизельного топлива.

Для количественной оценки испаряемости топлива можно воспользоваться формулой определения среднеобъемной температуры кипения [42, 52]:

$$T_{срo} = \frac{T_{10} + T_{30} + T_{50} + T_{70}}{4}, \quad (2.3)$$

где  $T_{10}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{70}$  – температуры соответствующие выкипанию 10, 30, 50, 70% объема топлива.

## 2.2 Математическое моделирование нагрева дизельного топлива в прямоугольном волноводе

Для расчета мощности источника СВЧ нагрева  $P_{свч}$  известно выражение [6]:

$$P_{свч} = P(x, y) \cdot V = 0,55 \cdot \varepsilon \cdot tg\sigma \cdot f \cdot |\vec{E}(x, y, z)|^2 \cdot 10^{-12} \cdot V, \quad (2.4)$$

где  $P(x, y)$  - функция, определяющая распределение удельной поглощенной мощности по поперечному сечению прямоугольного волновода;

$V$  – объем камеры нагрева;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость топлива;

$\sigma$  – угол диэлектрических потерь топлива;

$f$  – частота электромагнитного поля;

$|\vec{E}(x, y, z)|^2$  – квадрат модуля напряженности электромагнитного поля.

Для локализации области, в которой распространяется электромагнитное поле, используют направляющие системы. Они служат для передачи электромагнитной энергии от источника к потребителю. Различают направляющие системы открытого и закрытого типов. В линиях передачи закрытого типа вся энергия электромагнитного поля сосредоточена в пространстве, окруженном металлической оболочкой той или иной формы, например, прямоугольной или круглой [10, 17, 24, 56, 79], поэтому их применение в технологических установках СВЧ нагрева является более предпочтительным по следующим причинам: во-первых, элек-

ромагнитная энергия передается от источника к диэлектрику практически без потерь, так как она не рассеивается в окружающем пространстве; во-вторых, электромагнитные волны, распространяющиеся в волноводе, безопасны для человека; в-третьих, использование многомодового режима возбуждения позволяет создавать в волноводе электромагнитные поля со сложной пространственной конфигурацией и др.

Известно [6, 56], что продольные составляющие электрического и магнитного полей удовлетворяют однородным уравнениям Гельмгольца:

для продольной составляющей электрического поля:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + g^2 E_z = 0, \quad (2.5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

для продольной составляющей магнитного поля:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + g^2 H_z = 0, \quad (2.6)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля.

Здесь  $g$  – поперечное волновое число:  $g = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$ ,

Решение уравнения (2.6) при условии  $E_z = 0$  на стенках волновода, т. е. при  $x = 0, x = a$  и  $y = 0, y = b$ , имеет вид

$$E_z(x, y, z) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.7)$$

где  $m$  и  $n$  - определяют число длин полуволен, укладываемых вдоль стенок волновода по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

Подставляя продольную составляющую электрической волны  $E_z(x, y, z)$  в уравнения, связывающие продольные и поперечные составляющие [56], получим

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j h \gamma_x}{\gamma^2} E_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.8)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{j h \gamma_y}{\gamma^2} E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.9)$$

$$H_x(x, y, z) = \frac{j \omega \varepsilon_a \gamma_y}{\gamma^2} E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.10)$$

$$H_y(x, y, z) = -\frac{j\omega \varepsilon_a \gamma_x}{\gamma^2} E_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.11)$$

Здесь  $\gamma^2 = \gamma_x^2 + \gamma_y^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$ ,

$\gamma$  – постоянная распространения.

Низшим типом среди волн  $E_{mn}$  обладающим наибольшей критической длиной волны, является волна  $E_{11}$ , с критической длиной волны  $\lambda_{кр}$  равной

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}}, \quad (2.12)$$

Решение уравнения (2.6) при условии  $-\frac{\partial H_z}{\partial x} = 0$ ,  $x = 0$ ,  $x = a$  и  $y = 0$ ,  $y = b$ ,

имеет вид

$$H_z(x, y, z) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.13)$$

Подставляя продольную составляющую магнитного поля  $H_z(x, y, z)$  в уравнения, связывающие продольные и поперечные составляющие [56], получим

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j\omega \mu_a \gamma_y}{\gamma^2} H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.14)$$

$$E_y(x, y, z) = \frac{j\omega \mu_a \gamma_x}{\gamma^2} H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.15)$$

$$H_x(x, y, z) = \frac{jh\gamma_x}{\gamma^2} H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz), \quad (2.16)$$

$$H_y(x, y, z) = \frac{jh\gamma_y}{\gamma^2} H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \exp(-jhz). \quad (2.17)$$

Если  $a > b$ , то низшим типом среди волн  $H_{mn}$  является волна  $H_{10}$  с критической длиной волны  $\lambda = 2a$ .

Нужно отметить, что волна  $H_{10}$  является низшим типом волн среди всех возможных типов волн в прямоугольном волноводе. При заполнении волновода диэлектриком с  $\varepsilon\mu > 1$  критические длины волн для всех типов волн увеличиваются пропорционально множителю  $\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}$ .

При математическом моделировании СВЧ нагрева топлива предполагается, что в прямоугольном волноводе возбуждается единственный тип волны.

Наибольший практический интерес представляют моды с наибольшими значениями критической длины волны  $E_{11}$  и  $H_{10}$ . Выражение для квадрата модуля напряженности электрического поля записывается в следующем виде

$$|\vec{E}(x, y, z)|^2 = (|E_{mn}^+(x, y)|^2 + |E_{mn}^z(x, y)|^2) |\exp(-\gamma_{mn}z) + \exp(-\gamma_{mn}(2L - z))|^2, \quad (2.18)$$

где  $E_{mn}^+(x, y, z)$  и  $E_{mn}^z(x, y, z)$  - поперечные и продольные составляющие напряженности электрического поля волн  $mn$ -го типа;

$\gamma_{mn}$  - постоянная распространения волн  $mn$ -го типа;

$L$  - длина заполненной части волновода.

Для волн электрического и магнитного типа указанные составляющие имеют вид:

для волны  $E_{11}$

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j h \gamma_x}{\gamma^2} E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j h z), \quad (2.19)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{j h \gamma_y}{\gamma^2} E_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j h z), \quad (2.20)$$

$$E_z(x, y, z) = E_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \exp(-j h z); \quad (2.21)$$

для волны  $H_{10}$ :

$$E_y(x, y, z) = \frac{j \omega \mu_a \gamma_x}{\gamma^2} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp(-j h z). \quad (2.22)$$

Функцию удельной поглощенной мощности  $Q(x, y, z)$  выбираем в виде

$$Q(x, y, z) = P(x, y) \exp(-2 \alpha z), \quad (2.23)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания электромагнитной волны в материале, заполняющем волновод.

При математическом моделировании СВЧ нагрева в прямоугольном волноводе предполагается, что теплофизические свойства топлива не зависят от температуры. При сделанных допущениях распределение температуры в топливе удовлетворяет уравнению теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q(x, y, z)}{c \cdot \rho}, \quad (2.24)$$

$$t > 0, 0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < L$$

где  $Q(x, y, z)$  – функция тепловых потерь, пропорциональная квадрату модуля напряженности электрического поля в топливе.

Граничные условия для уравнения (2.24) принимались в следующем виде:

на стенках ( $x = 0, x = a$ ) задается граничное условие третьего рода

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, z, \tau) = k(T(x, y, z, \tau) - T_s);$$

на стенках ( $y = 0, y = b$ ) задается граничное условие третьего рода:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial y}(x, y, z, \tau) = k(T(x, y, z, \tau) - T_s).$$

Здесь  $k$  – коэффициент теплообмена на боковых стенках волновода;

$T_s$  – температура окружающей среды.

При  $z = 0$  и при  $z = L$  задается условие теплоизоляции:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0,$$

причем значение  $L$  выбирается много большим глубины проникновения электромагнитной волны в топливо, что позволяет пренебречь при математическом моделировании влиянием отраженной волны. Начальное условие при  $\tau = 0$  задается в виде:

$$T(x, y, z) = T_0.$$

Для решения задачи методом конечных разностей по неявной разностной схеме в трехмерной области ( $0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < L$ ) вводится равномерная по координатам  $x, y$  и  $z$  сетка  $x_i = (i - 1)\Delta x, i = 1, 2, \dots, N_i, \Delta x = \frac{a}{N_i - 1}, y_k = (k - 1)\Delta y, k = 1, 2, \dots, N_k, \Delta y = \frac{b}{N_k - 1}, z_j = (j - 1)\Delta z, j = 1, 2, \dots, N_j, \Delta z = \frac{L}{N_j - 1}$ .

Обозначим через  $T'_{ikj} = T(x_i, y_k, z_j, \tau_n)$  и  $T_{ikj} = T(x_i, y_k, z_j, \tau_{n-1})$  значения температуры в узлах сетки для последующего и предыдущего временного слоя соответственно  $\tau_n = (n - 1)\Delta \tau$ .

Составим конечно-разностное уравнение для внутреннего элементарного объема, содержащего узловую точку  $(x_i, y_k, z_j)$ . Этот элементарный объем окружен шестью соседними, поэтому в уравнении теплового баланса учитываются шесть тепловых потоков от соседних объемов:

$$\begin{aligned}
& \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z} (c \cdot \rho(T' - T)) dx dy dz = \\
& = \lambda \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left( \frac{T'_{i-1kj} - 2T'_{ikj} + T'_{i+1kj}}{\Delta x} \Delta y \Delta z + \frac{T'_{ik-1j} - 2T'_{ikj} + T'_{ik+1j}}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \frac{T'_{ikj-1} - 2T'_{ikj} + T'_{ikj+1}}{\Delta z} \Delta x \Delta y \right) d\tau + \\
& + \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z} Q(x, y, z) dx dy dz \cdot \Delta \tau
\end{aligned}$$

Заменяя интегралы в уравнении теплового баланса квадратурными формулами, получим консервативную разностную схему для внутренних узлов:

$$\begin{aligned}
c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{T'_{ikj} - T_{ikj}}{\Delta \tau} = \lambda \left( \frac{T'_{i-1kj} - 2T'_{ikj} + T'_{i+1kj}}{\Delta x} \Delta y \Delta z + \frac{T'_{ik-1j} - 2T'_{ikj} + T'_{ik+1j}}{\Delta y} \Delta x \Delta z + \right. \\
\left. + \frac{T'_{ikj-1} - 2T'_{ikj} + T'_{ikj+1}}{\Delta z} \Delta x \Delta y \right) + \\
+ \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z} Q(x, y, z) dx dy dz \\
i=2 \dots N_{i-1}, k=2 \dots N_{k-1}, j=2 \dots N_{j-1}
\end{aligned}$$

Для узловых точек, лежащих на границах топлива при  $z = 0$  и  $j = 1$  из уравнения теплового баланса получим:

$$\begin{aligned}
c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{T'_{ik1} - T_{ik1}}{2\Delta \tau} = \\
= \lambda \left( \frac{T'_{i-1k1} - 2T'_{ik1} + T'_{i+1k1}}{2\Delta x} \Delta y \Delta z + \frac{T'_{ik-11} - 2T'_{ik1} + T'_{ik+11}}{2\Delta y} \Delta x \Delta z + \right. \\
\left. + \frac{T'_{ik2} - T'_{ik1}}{\Delta z} \Delta x \Delta y \right) + \\
+ \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_0^{0,5\Delta z} Q(x, y, z) dx dy dz
\end{aligned}$$

$$i = 2 \dots N_{i-1}, k = 2 \dots N_{k-1}$$

Аналогично для узловых точек при  $z = L$  и  $j = N_j$  получим:

$$\begin{aligned} c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{T'_{ikN_j} - T_{ikN_j}}{2\Delta\tau} = \\ = \lambda \left( \frac{T'_{i-1kN_j} - 2T'_{ikN_j} + T'_{i+1kN_j}}{2\Delta x} \Delta y\Delta z + \frac{T'_{ik-1N_j} - 2T'_{ikN_j} + T'_{ik+1N_j}}{2\Delta y} \Delta x\Delta z + \right. \\ \left. + \frac{T'_{ikN_j} - T'_{ikN_{j-1}}}{\Delta z} \Delta x\Delta y \right) + \\ + \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{L-0,5\Delta z}^L Q(x, y, z) dx dy dz \end{aligned}$$

$$i=2, \dots, N_{i-1}, k=2, \dots, N_{k-1}$$

Для точек, лежащих на боковых стенках волновода при  $x = 0$ ,  $i = 1$ ,  $x = a$ ,  $i = N_i$

разностные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{T'_{1kj} - T_{1kj}}{2\Delta\tau} = \lambda \left( \frac{T'_{2kj} - T'_{1kj}}{\Delta x} \Delta y\Delta z + \frac{T'_{1k-1j} - 2T'_{1kj} + T'_{1k+1j}}{2\Delta y} \Delta x\Delta z + \right. \\ \left. + \frac{T'_{1kj-1} - 2T'_{1kj} + T'_{1kj+1}}{2\Delta z} \Delta x\Delta y \right) + \\ + \int_{x_i-0,5\Delta x}^{x_i+0,5\Delta x} \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z} Q(x, y, z) dx dy dz - k(T'_{1kj} - T_s)\Delta y\Delta z \end{aligned}$$

$$j=2, \dots, N_{j-1}, k=2, \dots, N_{k-1}$$

$$\begin{aligned} c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{T'_{N_ikj} - T_{N_ikj}}{2\Delta\tau} = \lambda \left( \frac{T'_{N_{i-1}kj} - T'_{N_ikj}}{\Delta x} \Delta y\Delta z + \frac{T'_{N_ik-1j} - 2T'_{N_ikj} + T'_{N_ik+1j}}{2\Delta y} \Delta x\Delta z + \right. \\ \left. + \frac{T'_{N_ikj-1} - 2T'_{N_ikj} + T'_{N_ikj+1}}{2\Delta z} \Delta x\Delta y \right) + \\ + \int_{a-0,5\Delta x}^a \int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y} \int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z} Q(x, y, z) dx dy dz - k(T'_{N_ikj} - T_s)\Delta y\Delta z \end{aligned}$$

Аналогично для стенок волновода  $y = 0$ ,  $k = 1$  и  $y = b$ ,  $k = N_k$ .

Для узловых точек, лежащих на ребрах, учитываются тепловые потоки двух граней. Так, например, записав уравнение теплового баланса для узловой точки  $(x_i, y_l, z_j)$ , получим разностное уравнение

$$c\rho\Delta x\Delta y\Delta z\frac{T'_{N_i1j}-T_{N_i1j}}{4\Delta\tau}=\lambda\left(\frac{T'_{N_{i-1}1j}-T'_{N_i1j}}{2\Delta x}\Delta y\Delta z+\frac{T'_{N_i2j}-2T'_{N_i1j}}{2\Delta y}\Delta x\Delta z+\frac{T'_{N_i1j-1}-2T'_{N_i1j}+T'_{N_i1j+1}}{4\Delta z}\Delta x\Delta y\right)+\int_{a-0,5\Delta x}^a\int_{y_k-0,5\Delta y}^{y_k+0,5\Delta y}\int_{z_j-0,5\Delta z}^{z_j+0,5\Delta z}Q(x,y,z)dxdydz-0,5k(T'_{N_i1j}-T_s)\Delta y\Delta z-0,5k(T'_{N_i1j}-T_s)\Delta x\Delta z$$

И аналогично, для узловых точек, лежащих в других углах, начальные условия записываются в виде  $T'_{ikj} = T_0$

Значения температуры  $T'_{ikj}$  в узловых точках на следующем временном слое находятся путем решения системы  $N_i, N_k, N_j$  линейных уравнений. Значения температуры на первом временном слое определяется из начального условия.

На рисунке 2.4 приведены изотермы в поперечном сечении прямоугольного волновода ( $z = 0.05$  м) при возбуждении в нем волны  $E_{11}$ .

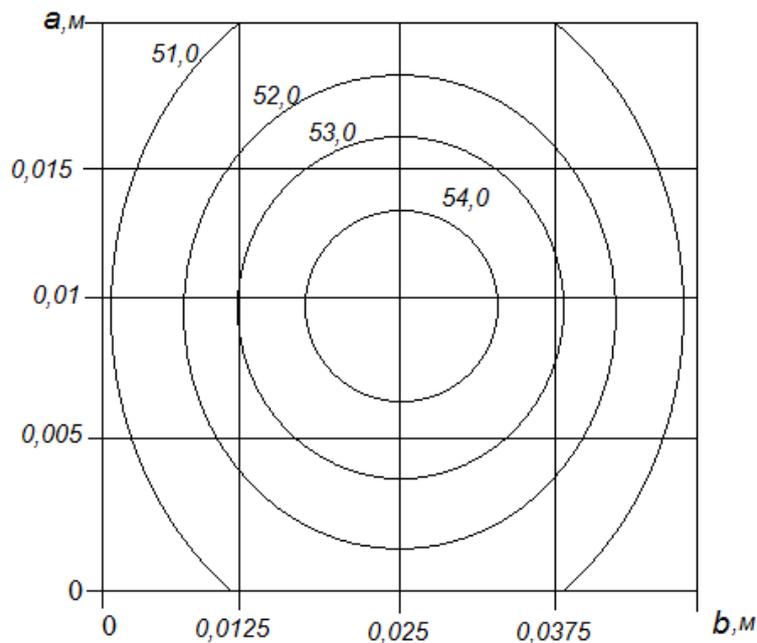


Рисунок 2.4 – Изотермы в поперечном сечении волновода

### 2.3 Определение изменения температуры топлива при его продвижении в системе топливоподачи

Для вычисления конечной температуры топлива перед форсункой необходимо проведение расчетов, связанных с учетом тепловых потерь топлива в каналах и трубопроводах системы топливоподачи [87].

Тепловые потери на участках системы топливоподачи можно рассматривать как конвективные потери в трубопроводах [23]. Тогда изменение температуры топлива в системе топливоподачи можно представить в виде

$$\Delta T = \sum_i \Delta T_i + \Delta T_n, \quad (2.25)$$

где  $\Delta T_i$  – приращение температуры топлива на  $i$  – м участке системы топливоподачи в результате конвективного теплообмена;

$\Delta T_n$  – нагрев топлива в процессе продвижения топлива в системе топливоподачи.

#### Определение температуры топлива в результате конвективного теплообмена

Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной среде [48].

Для удобства расчетов теплотерь топливо можно представить в виде стержня, у которого площадь поперечного сечения очень мала по сравнению с его длиной.

Обозначим площадь поперечного сечения стержня через  $f$  и периметр через  $u$ . Стержень находится в среде с постоянной температурой  $T_f$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности стержня к окружающей среде будем считать постоянным для всей поверхности.

Будем полагать также, что значения коэффициента теплопроводности топлива  $\lambda_T$  достаточно велики, а площадь поперечного сечения очень мала по сравнению с его длиной. Последнее дает основание пренебречь изменением температуры в поперечном сечении и считать, что она изменяется только вдоль оси стержня.

ня. Для удобства дальнейших выкладок отсчет температуры будем вести от  $T_f = \text{const}$ . Отсчитанную таким образом избыточную температуру стержня обозначим через  $\Theta$ .

Очевидно,

$$\Theta = T - T_f, \quad (2.26)$$

где  $T_f$  — температура среды, окружающей стержень,  $T$  — текущая температура стержня.

Если задана температура основания стержня  $T_1$ , то избыточная температура стержня (рисунок 2.5) будет:  $\Theta_1 = T_1 - T_f$ .

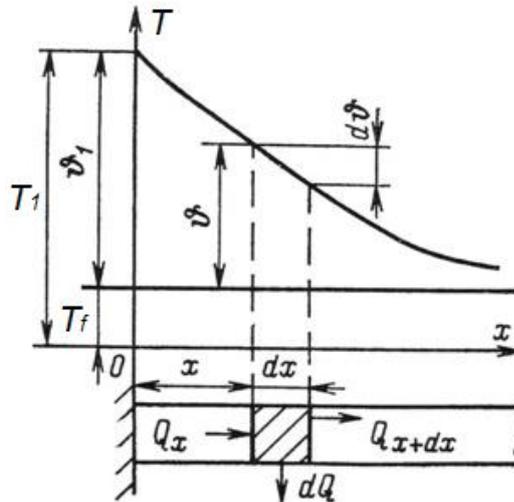


Рисунок 2.5 – Перенос теплоты через стержень

На расстоянии  $x$  от основания стержня выделим элемент стержня длиной  $dx$ . Уравнение теплового баланса для рассматриваемого элемента можно записать в виде:

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (2.27)$$

где  $Q_x$  — количество теплоты, входящее в левую грань элемента за единицу времени;

$Q_{x+dx}$  — количество теплоты, которое выходит из противоположной грани элемента за то же время;

$dQ$  — количество теплоты, отдаваемое за единицу времени наружной поверхностью элемента окружающей его среде.

Согласно закону Фурье

$$Q_x = -\lambda_T \frac{d\theta}{dx} f, \quad (2.28)$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda_T \frac{d}{dx} \left( \theta + \frac{d\theta}{dx} dx \right) f, \quad (2.29)$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda_T f \frac{d\theta}{dx} - \lambda f \frac{d^2\theta}{dx^2}, \quad (2.30)$$

$$Q_x - Q_{x+dx} = \lambda_T f \frac{d^2\theta}{dx^2}, \quad (2.31)$$

$$dQ = \alpha_{TT} \theta u dx, \quad (2.32)$$

где  $\alpha_{TT}$  – коэффициент теплопередачи.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{\alpha_{TT} \theta u}{\lambda_T f} = m^2 \theta, \quad (2.33)$$

$$m = + \sqrt{\frac{\alpha_{TT} u}{\lambda_T f}}, \quad (2.34)$$

$$\theta = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx}, \quad (2.35)$$

Значения постоянных  $c_1$  и  $c_2$  определяются из граничных условий, которые задаются в зависимости от длины стержня и других факторов.

Граничные условия принимаются в виде

$$\begin{cases} x = 0, \theta = \theta_1 \\ x = l, \theta = -\lambda_T \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=l} \end{cases} \quad (2.36)$$

где  $\theta$  — температура на конце стержня;  $\alpha_l$  — коэффициент теплоотдачи с торца стержня.

Для определения постоянных  $c_1$  и  $c_2$  в уравнении (2.35) используем граничные условия (2.36):

$$\begin{cases} x = 0, & \theta_1 = c_1 + c_2 \\ x = l, & \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=l} = c_1 m^{ml} - c_2 m e^{-ml} = -\frac{\alpha_l}{\lambda_T} \theta_l \text{ и} \\ & \theta = c_1 e^{ml} + c_2 e^{-ml} \end{cases} \quad (2.37)$$

$$c_1 = \frac{\theta_1 \left( m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T} \right)}{e^{2ml} \left( m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T} \right) + m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T}} \quad c_2 = \theta_1 \frac{e^{2ml} \left( m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T} \right)}{e^{2ml} \left( m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T} \right) + m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T}}, \quad (2.38)$$

$$\theta = \theta_1 \left[ \frac{(m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T})}{e^{2ml}(m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T}) + m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T}} + \frac{e^{2ml}(m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T})}{e^{2ml}(m + \frac{\alpha_l}{\lambda_T}) + m - \frac{\alpha_l}{\lambda_T}} \right], \quad (2.39)$$

Подставляя полученные значения  $c_1$  и  $c_2$  в уравнение (2.35), получаем (2.36). Умножив и разделив правую часть уравнения (2.39) на  $e^{-ml}$  и произведя алгебраические преобразования, получим:

$$\theta = \theta_1 \left[ \frac{m[e^{m(l-x)} + e^{-m(l-x)}] + \frac{\alpha_l}{\lambda_T}[e^{m(l-x)} - e^{-m(l-x)}]}{m[e^{ml} + e^{-ml}] + \frac{\alpha_l}{\lambda_T}[e^{ml} - e^{-ml}]} \right], \quad (2.40)$$

$$ch(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \text{и} \quad sh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad (2.41)$$

тогда

$$\theta = \theta_1 \frac{ch[m(l-x)] + \frac{\alpha_l}{m\lambda_T} sh[m(l-x)]}{ch[ml] + \frac{\alpha_l}{m\lambda_T} sh[ml]}, \quad (2.42)$$

Граничные условия запишем в виде

$$\begin{cases} x = 0, \theta = \theta_1 \\ x = l, \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (2.43)$$

Последнее можно допустить для случая, когда  $\alpha_l$  на торце стержня мало, а коэффициент теплопроводности топлива  $\lambda_T$  велик и отношение  $\alpha_l / \lambda_T \rightarrow 0$ , т. е. можно пренебречь теплоотдачей с торца стержня.

Для этих условий в соотношении (2.43) вторые члены числителя и знаменателя правой части обращаются в нуль и уравнение принимает вид:

$$\theta = \theta_1 \frac{ch[m(l-x)]}{ch[ml]}, \quad (2.44)$$

$$\theta = \theta_1 \frac{ch\left[\sqrt{\frac{\alpha_{ТТu}}{\lambda_{Тf}}}(l-x)\right]}{ch\left[\sqrt{\frac{\alpha_{ТТu}}{\lambda_{Тf}}}l\right]}, \quad (2.45)$$

## 2.4 Определение коэффициентов теплопередачи

Из теории теплопередачи известно, что при конвективном теплообмене коэффициент теплопередачи является сложной функцией, зависящей от ряда различных факторов (физико-химических свойств теплоносителей, формы и размеров поверхности теплообмена) и может быть выражен в общем виде [44]:

$$\alpha_{\text{ТТ}} = f(\nu, c, \lambda, \rho, V, d_{\text{T}}) \quad (2.46)$$

Это уравнение устанавливает приближенную модель механизма процесса, так как определяет не точные численные зависимости, а только логический выбор переменных, влияющих на коэффициент теплопередачи. Найти функцию в общем виде аналитическим путем такого сложного процесса как теплопередача в топливопроводе топливоподающей системы и смазочной системе сводится к составлению и решению дифференциальных уравнений математической физики совместно с уравнениями однозначности. Составление такой системы уравнений связано с решением проблем гидродинамики, физической химии и пр.

### Критериальные формулы для описания теплообмена во внутренней задаче (вынужденное течение)

Теплообмен в канале определяется режимом течения и теплофизическими характеристиками движущейся среды, но независимо от них распределение интенсивности теплообмена по длине трубы имеет вид, приведенный на рисунке 2.6.

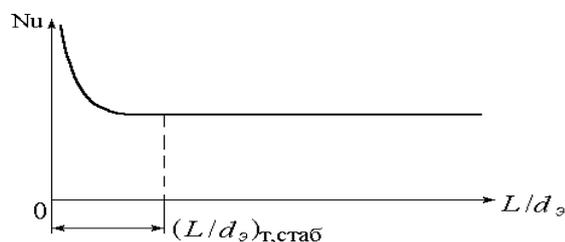


Рисунок 2.6 – Распределение интенсивности теплообмена

Вследствие этого при ламинарном режиме течения сила инерции становится пренебрежимо малой по сравнению с силой вязкостного трения, а мера их отношения – критерий Рейнольдса – вырождается и выпадает из числа аргументов для описания интенсивности теплообмена [48].

При турбулентном режиме течения даже при стабилизировавшемся профиле скорости вследствие турбулентных пульсаций в потоке существенными являются и инерционные силы и силы вязкостного трения, так что мера их отношения – критерий  $Re$  – должна быть включена в качестве аргумента для числа  $Nu$ . Турбулентные пульсации температуры на участке стабилизировавшейся теплоотдачи приводят к тому, что существенным для интенсивности теплопереноса в потоке остается и критерий  $Pe$ .

### Теплообмен при ламинарном вязкостном режиме течения

В этом случае на ламинарное течение ( $0 < Re < 2320$ ) не накладывається влияние свободной конвекции, формирующейся из-за значительной разности температур в потоке и на омываемой им теплообменной поверхности [48]. При этом для круглой трубы длина участка тепловой стабилизации оказывается равной

$$\left(\frac{L}{d_T}\right)_{\text{стаб}} \cong (0,03 \div 0,05)Pe, \quad (2.47)$$

где  $Pe = \frac{w_0 d_T}{\alpha_f}$  – критерий Пекле.

У самого входа в теплообменный участок ( $L/d \leq 0,0005 Pe$ ) интенсивность теплообмена при постоянной температуре поверхности круглой трубы определяется по формуле Левека [48]:

$$Nu = 1,615 \left( Pe \frac{d_T}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.48)$$

где  $Nu = \frac{\bar{\alpha} d_T}{\lambda_f}$  и  $\bar{\alpha}$  – средние значения числа Нуссельта и коэффициента теплоотдачи на участке трубы длиной  $L$ .

Если  $0,0005 Pe < L/d_T < (L/d_T)_{\text{стаб}}$ , то используется формула (2.49) с заменой в ней коэффициента 1,615 на 1,55, так что с учетом температурного фактора получаем

$$Nu = 1,55 \left( Pe \frac{d_T}{L} \right)^{\frac{1}{3}} C_T, \quad (2.49)$$

Интенсивность стабилизированного теплообмена (когда  $L/d \geq (L/d)_{\text{стаб}}$ ) при ламинарном течении в круглой трубе определяется по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha d_T}{\lambda_f} = 4,36. \quad (2.50)$$

Отсутствие критерия  $Pe$  в качестве аргумента для числа  $Nu$  в правой части последних двух формул объясняется тем, что в области стабилизировавшегося теплообмена количество тепла, переносимого конвекцией в направлении течения, пренебрежимо мало по сравнению с количеством тепла, переносимого механизмом теплопроводности по направлению к обтекаемой поверхности. Вследствие этого мера их отношения (критерий  $Pe$ ) вырождается, т. е. также, наряду с критерием Рейнольдса, перестает быть аргументом для числа  $Nu$  [48].

Теплообмен при ламинарном гравитационно-вязкостном течении

Критериальные формулы для описания теплообмена в этом режиме течения ( $0 < Re < 2320$ ) учитывают наложение на ламинарное течение топлива термической свободной конвекции, которая возникает при значительных разностях температур потока и омываемой поверхности [72].

Учет влияния свободной конвекции на вынужденное ламинарное движение и теплообмен в канале производят в том случае, когда величина критерия Рэлея, вычисленная с использованием в качестве характерного размера внутреннего диаметра трубы, соответствует неравенству  $Ra \geq Ra_0 = 5 \cdot 10^5$  [6, 7, 72].

Предложено большое количество экспериментальных зависимостей для описания теплообмена при ламинарном гравитационно-вязкостном течении. Наш опыт их использования позволяет предложить следующую критериальную зависимость для горизонтально расположенной круглой трубы с постоянной температурой омываемой поверхности  $T_w = const$ :

$$Nu = Nu_0 \{1 + [(Ra - Ra_0) \cdot 10^{-6}]^{0,1}\}, \quad (2.51)$$

где  $Nu_0 = \frac{\bar{\alpha}_0 d_T}{\lambda_f}$  и  $\bar{\alpha}_0$  – средние значения числа Нуссельта и коэффициента теплоотдачи на участке трубы длиной  $L$ , рассчитанные по формулам для ламинарного вязкостного режима течения;

$Ra = \frac{\beta g d^3 \Delta T \cdot Pr}{\nu^2}$  – критерий Рэлея.

Если труба расположена вертикально, то полученные по формуле (2.52) значения  $Nu$  и  $\bar{\alpha}_0$  уменьшаются на 15 % при совпадении направлений вынужденного и свободного движения, и увеличиваются на 15 % – в противном случае [72].

**Теплообмен при турбулентном режиме течения**

При турбулентном режиме течения в канале ( $Re > 10^4$ ) длина участка тепловой стабилизации в настоящее время принимается равной [72 ]

$$\left(\frac{L}{d_3}\right)_{\text{стаб}} \approx 10 \div 15, \quad (2.53)$$

и для описания теплообмена рекомендуется формула Крауссольда–Михеева, полученная на основании обработки большого количества экспериментальных данных:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}C_L C_T. \quad (2.54)$$

Функция  $C_L=f(L/d_T)$ , учитывающая влияние на теплообмен расстояния от входа в канал, экспериментально установлена. Для проведения расчетов нам представилось полезным аппроксимировать ее в виде

$$C_L = 1,65(Re \cdot 10^{-4})^z \left(\frac{L}{d_3}\right)^{-0,128} \quad (2.55)$$

где

$$z = -0,08 \left(\frac{L}{d_3}\right)^{-0,45} \text{ при } \frac{L}{d_3} \leq 50(Re \cdot 10^{-4})^{-0,1} \quad (2.56)$$

При больших значениях  $\frac{L}{d_3}$  имеем  $C_L = 1$

**Теплообмен при переходном режиме течения**

В переходном режиме ( $2320 < Re < 10^4$ ) неустойчивость течения приводит и к неустойчивости теплообмена. Вследствие этого опытные данные различных исследователей заметно отличаются друг от друга [48].

Наш опыт проведения расчетов теплообмена в этой области течения позволяет рекомендовать следующую простую зависимость:

$$Nu = Nu_1 + (Nu_2 - Nu_{11}) \frac{Re - Re_{кр}}{10^4 - Re_{кр}} \quad (2.57)$$

где  $Nu_1$  и  $Nu_2$  – значения чисел Нуссельта для ламинарного (вязкостного или гравитационно-вязкостного) режима течения при  $Re=Re_{кр}=2320$  и для турбулентного режима течения при  $Re=10^4$ , вычисленные по приведенным выше формулам.

## **2.5 Исследование характеристик впрыскивания и распыливания топлива на пусковых режимах**

Для улучшения пусковых качеств дизеля необходимо обеспечить требуемый характер протекания процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания не только на основных эксплуатационных режимах, но и на режиме пуска. При этом следует отметить, что пусковые режимы работы топливной аппаратуры дизеля существенно отличаются от остальных режимов. Для облегчения холодного пуска дизеля обычно увеличивают цикловую подачу топлива (в 1,5-2,5 раза) и уменьшают угол опережения впрыскивания (на 5-10 ° п.к.в.), что приводит, соответственно, к изменению характеристик распыливания и повышению температуры воздушного заряда в цилиндре в период впрыскивания [31, 68]. В результате требования к процессам впрыскивания и распыливания топлива на пусковых и эксплуатационных режимах могут оказаться противоречивыми.

Работы по совершенствованию процессов впрыскивания и распыливания топлива в дизелях с неразделенными камерами сгорания показывают, что влияние на смесеобразование на режиме пуска оказывают конструкция и техническое состояние форсунок, в первую очередь - распылителей форсунок, а также мелкость распыливания топлива, подаваемого в камеру сгорания. Повышение пусковых качеств дизелей может быть достигнуто путем улучшения мелкости распыливания топлива, подаваемого в камеру сгорания, и более рационального распределения топлива по объему камеры при уменьшении доли топлива, попадаемого на стенки

цилиндра [4, 46, 47, 53]. Для этого необходимо обеспечить согласование геометрических характеристик струй топлива, распыливаемого на режимах пуска, с формой камеры сгорания.

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 дальность топливной струи, что уменьшает долю объемного смесеобразования и приводит к попаданию на стенки камеры сгорания большего количества топлива. С понижением вязкости топлива средний диаметр капель топлива уменьшается и становится более однородным распыл. Однако при этом угол рассеивания топливной струи увеличивается, а дальность 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 и сгорания.

### **2.5.1 Влияние физических показателей топлива на показатели работы топливной аппаратуры и параметры струи распыленного топлива**

Если плотность топлива обуславливает массовую цикловую подачу топлива (ЦПТ), то от вязкости зависят утечки топлива через зазоры прецизионных пар топливоподающей аппаратуры, степень дросселирования топлива в дополнительных и отсечных отверстиях втулки плунжера при их открытии и закрытии, а также в сопловых отверстиях распылителя форсунки. От вязкости и коэффициента сжимаемости топлива зависят коэффициент подачи топливного насоса высокого давления (ТНВД), действительный угол опережения подачи топлива и объемная ЦПТ [53, 54].

При создании и разработке математической модели смесеобразования и сгорания дизельного топлива используются математические выражения и критериальные зависимости, предложенные А.С. Лышевским и уточненные Н.Ф. Разлейцевым применительно к быстроходным форсированным дизелям с камерами сгорания неразделенного типа [52, 72].

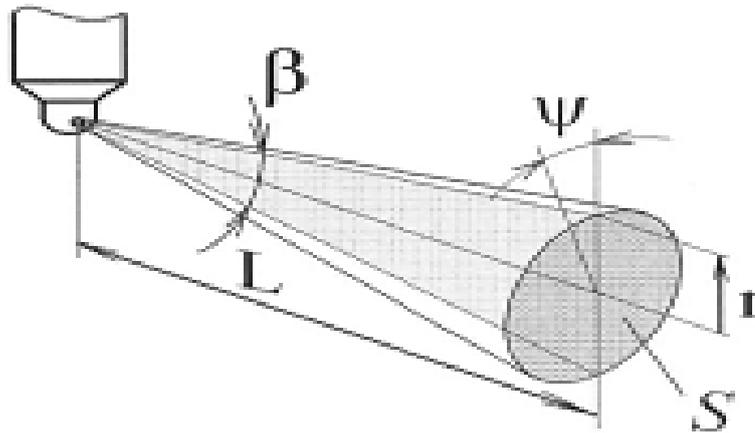


Рисунок 2.7 – Геометрические характеристики струи распыливаемого топлива

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

При получении А.С. Лышевским [52] критериальных зависимостей использовались данные опытов с жидкостями, для которых  $\rho_T$ ,  $\mu_T$  и  $\sigma_T$  изменялись в пределах:  $\rho_T = (0,7 - 0,93) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu_T = (0,4 - 89,7) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma_T = (22 - 30,7) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ .

Средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива:

$$U_0 = \frac{B_{\text{ц}}}{m f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{\text{впр}}}, \quad (2.58)$$

где  $B_{\text{ц}}$  – цикловая порция топлива;

$m f_c$  – площадь эффективного проходного сечения распыливающих отверстий;

$i$  – количество распыливающих отверстий;

$\rho_T$  – плотность топлива;

$\tau_{впр}$  – продолжительность впрыскивания порции топлива.

В формулах для расчета показателей струи распыленного топлива используются следующие критерии [52]:

- критерий Вебера, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и инерции:

$$W_e = \frac{U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T}, \quad (2.59)$$

- критерий  $M$ , характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости:

$$M = \frac{\mu_T^2}{d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma_T}, \quad (2.60)$$

- отношение плотностей воздуха и топлива:

$$j = \frac{\rho_a}{\rho_T}, \quad (2.61)$$

где  $d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки;

$\rho_a$  – плотность воздуха в цилиндре двигателя.

Проведем оценку влияния физических параметров топлива на характеристики впрыскивания и распыливания. При проведении оценки будем считать, что изменяются только тепловое состояние топлива, а режимные, регулировочные и конструктивные параметры двигателя остаются без изменений.

### **2.5.2 Расчет пути, проходимого топливной струей от распылителя до границы между начальным и основным участками развития струи**

Выражение для расчета границы между начальным и основным участками развития струи [52]:

$$L_T = C_s \cdot d_c \cdot W_e^{0,25} \cdot M^{0,4} \cdot j^{-0,6}, \quad (2.62)$$

$$L_T = C_s \cdot d_c \cdot \left[ \frac{d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T} \right]^{0,25} \cdot \left[ \frac{\mu_T^2}{d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma_T} \right]^{0,4} \quad (2.63)$$

После ряда преобразований получим выражение  $L_T$  функции величин  $\rho_T$ ,  $\mu_T$  и  $\sigma_T$

$$L_T = A \cdot \rho_T^{-0,05} \cdot \sigma_T^{-0,65} \cdot \mu_T^{0,8} \quad (2.64)$$

где  $A$  – множитель, включающий в себя постоянные величины.

Аналогично (1.6) запишем выражение для подогретого топлива:

$$L_{T\Gamma} = A \cdot \rho_{T\Gamma}^{-0,05} \cdot \sigma_{T\Gamma}^{-0,65} \cdot \mu_{T\Gamma}^{0,8} \quad (2.65)$$

Разделив выражение  $L_{T\Gamma}$  на  $L_T$ , получаем оценку проходимого пути топливной струей от распылителя до границы между начальным и основным участками развития струи

$$\frac{L_{T\Gamma}}{L_T} = \left[ \frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{-0,05} \cdot \left[ \frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{-0,65} \cdot \left[ \frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{0,8} \quad (2.66)$$

где:  $L_T$  – длина струи,  $\rho_T$  – плотность топлива,  $\mu_T$  – динамическая вязкость;  $\sigma_T$  – коэффициент поверхностного натяжения; индекс  $\Gamma$  здесь и далее обозначает нагретое топливо.

Как видно из выражения (2.66), увеличение или уменьшение плотности топлива относительно стандартной величины практически не влияет на границу между начальным и основным участками развития струи. Увеличение поверхностного натяжения и уменьшение вязкости топлива без изменения прочих условий распыла приводит к приближению к распылителю границы участков. Основным фактором, влияющим на расположение границы между участками, является величина динамической вязкости топлива, так как ее значение, в зависимости от теплового состояния топлива, может изменяться в широком диапазоне (десятки раз), тогда как поверхностное натяжение изменяется в 1,3–1,5 раза (рисунок 2.8) [52].

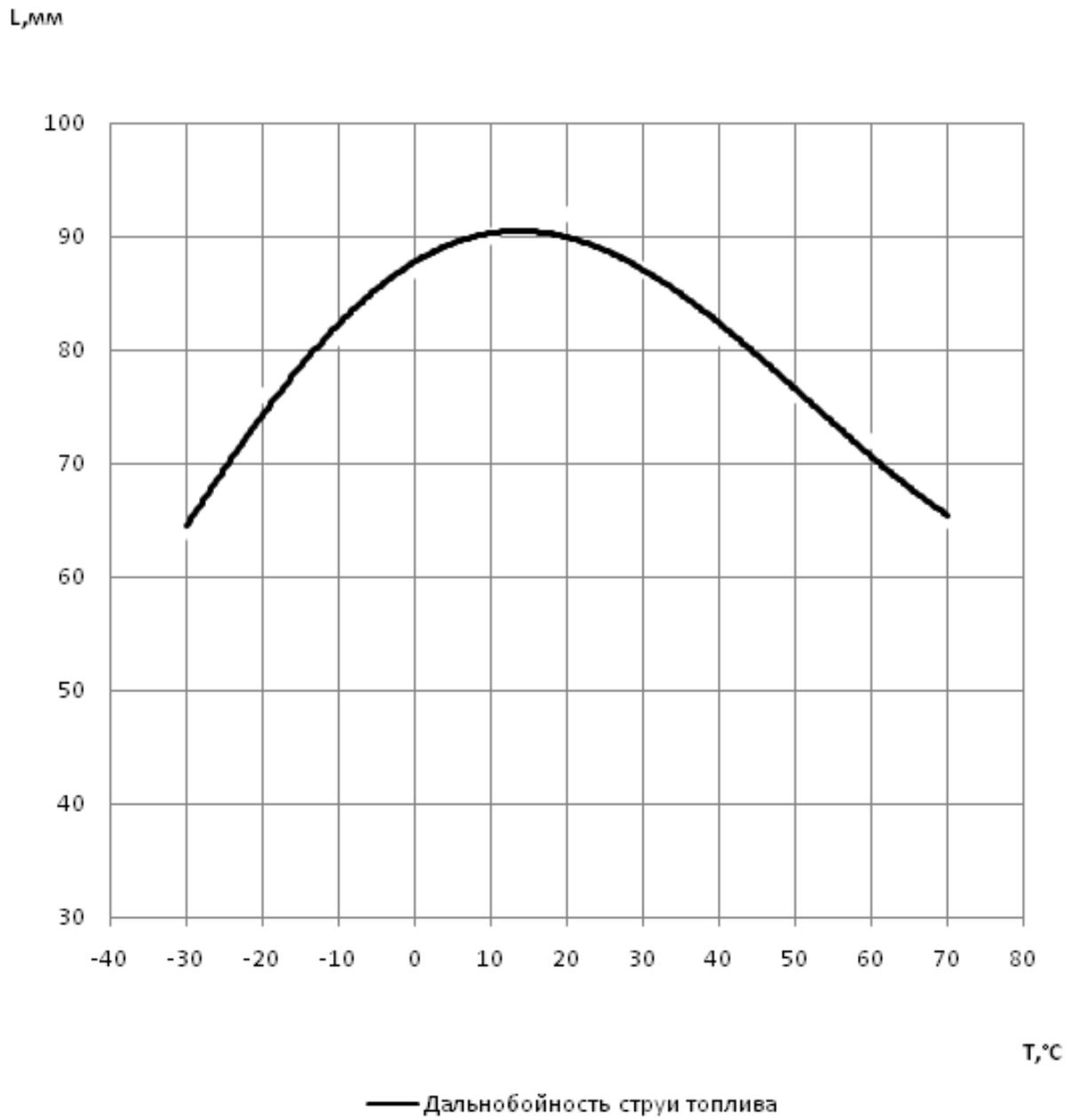


Рисунок 2.8 – Зависимость дальнобойности струи топлива от его температуры

### 2.5.3 Оценка относительного времени достижения струей топлива стенки камеры сгорания

Рассчитаем относительное время достижения струей топлива стенки камеры сгорания. При проведении расчетов принято, что путь, проходимый струей холодного и подогретого топлива, одинаков и равен расстоянию от распылителя форсунки до стенки камеры.

Запишем выражение для определения дальнобойности струи топлива на основном участке ее развития [52, 72,]:

$$L_T = B_s^{0,5} \cdot \tau_s^{0,5}, \quad (2.67)$$

где

$$B_s = \frac{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}}{D_s \cdot \sqrt{2} \cdot j},$$

$D_s=4...5$  – коэффициент.

Время достижения топливной струей стенки камеры сгорания  $\tau_s$  запишем следующим образом [52]

$$\tau_s = L_T^2 \frac{D_s \cdot \sqrt{2} \cdot j}{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}}, \quad (2.68)$$

После преобразований получим выражение

$$\tau_s = L_T^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_T^{0,37} \cdot \sigma_T^{0,37} \cdot \mu_T^{-0,32}, \quad (2.69)$$

Соответственно для подогретого топлива

$$\tau_{s\Gamma} = L_{T\Gamma}^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_{T\Gamma}^{0,37} \cdot \sigma_{T\Gamma}^{0,37} \cdot \mu_{T\Gamma}^{-0,32}, \quad (2.70)$$

Оценку относительного времени достижения вершиной струи топлива стенки камеры сгорания

$$\frac{\tau_{s\Gamma}}{\tau_s} = \left[ \frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{0,37} \cdot \left[ \frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{0,37} \cdot \left[ \frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{-0,32}, \quad (2.71)$$

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

Как видно из (2.71), по мере уменьшения  $\rho_T, \sigma_T, \mu_T$  по сравнению с аналогичными величинами для неподогретого 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, что оказывает влияние на динамику тепловыделения в начальной фазе процесса сгорания и уменьшению «жесткости» работы двигателя.

#### 2.5.4 Оценка влияния физических параметров топлива на мелкость его распыливания

Критериальное уравнение для отыскания средних диаметров капель топливной струи записывается в следующем виде [52, 72, 86]

$$d_k = E_k \cdot d_c \cdot [j \cdot W_e]^{-0,266} \cdot M^{0,0733}, \quad (2.72)$$

где  $E$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции форсунки и способа осреднения размеров капель.

Исходя из того, что конструкция форсунки остается неизменной при подогреве топлива, коэффициент  $E$  не изменяется.

Распишем составляющие уравнения для отыскания среднего диаметра капель холодного топлива

$$d_k = E_k \cdot d_c \cdot \left[ \frac{\rho_a}{\rho_T} \cdot \left( \frac{B_{\text{ц}}}{m_{f_c} \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{\text{впр}}} \right)^2 \frac{d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T} \right]^{-0,266} \left[ \frac{\mu_T^2}{d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma_T} \right]^{0,0733}$$

После преобразования получим

$$d_k = B \cdot \rho_T^{0,4587} \cdot \sigma_T^{0,1927} \cdot \mu_T^{0,1466}, \quad (2.73)$$

где  $B$  – константа, включающая в себя все величины, неизменные для разных видов топлива.

Уравнение для расчета среднего диаметра капель подогретого топлива

$$d_{k\Gamma} = B \cdot \rho_{T\Gamma}^{0,4587} \cdot \sigma_{T\Gamma}^{0,1927} \cdot \mu_{T\Gamma}^{0,1466}, \quad (2.74)$$

Относительное изменение диаметра капель при переходе от холодного топлива к подогретому

$$\frac{d_{k\Gamma}}{d_k} = \left[ \frac{\rho_{T\Gamma}}{\rho_T} \right]^{0,4587} \cdot \left[ \frac{\sigma_{T\Gamma}}{\sigma_T} \right]^{0,1927} \cdot \left[ \frac{\mu_{T\Gamma}}{\mu_T} \right]^{0,1466}, \quad (2.75)$$

где:  $d_k$  – диаметр капель.

Как видно из выражения (2.75), на диаметр капель оказывают влияние плотность, поверхностное натяжение и вязкость топлива. По мере уменьшения  $\rho_{T\Gamma}$ ,  $\sigma_{T\Gamma}$  и  $\mu_{T\Gamma}$  средний диаметр капель уменьшается. При применении подогретого топлива средний диаметр капли топлива уменьшается в 1,6 раза (по сравнению с подогретым дизельным топливом), что положительно сказывается на пуске дизеля в условиях низких температур, т.к. более мелкие капли топлива быстрее испаряются, чем достигается объемное смесеобразование. На рисунке 2.9 представлена зависимость среднего диаметра капель топлива от его температуры.

Оценка мелкости распыливания топлива производится по величинам средних диаметров капель: арифметического  $d_{10}$ , поверхностного  $d_{20}$ , объемного  $d_{30}$  и по Заутеру  $d_{32}$  (таблица 2.2) [52, 86]:

$$d_{fk} = \left( \frac{\sum d_i^f n_i}{\sum d_i^k n_i} \right)^{\frac{1}{f-k}}, \quad (2.76)$$

где  $f, k$  – целые числа, зависящие от способа осреднения;  $i$  – номер фракции, на которые разбита совокупность капель;  $d_i$  – средний диаметр  $i$  – той фракции,  $n_i$  – число капель  $i$  – той фракции.

Однородность распыливания топлива  $\zeta$  оценивается отношением средних диаметров  $d_{10}/d_{30}$  [52, 86]:

$$\zeta = \frac{d_{10}}{d_{30}} \quad (2.77)$$

Таблица 2.2 – Оценка мелкости распыливания топлива

Значения		Название среднего диаметра	Обозначение	Область применения
$f$	$k$			
1	0	арифметический	$d_{10}$	Сравнение дисперсных систем

2	0	поверхностный	$d_{20}$	Контроль поверхности
3	0	объемный	$d_{30}$	Контроль объема
3	2	объемно – поверхностный (по Заутеру)	$d_{32}$	Тепло- и массообмен
4	3	массовый	$d_{43}$	Процессы горения

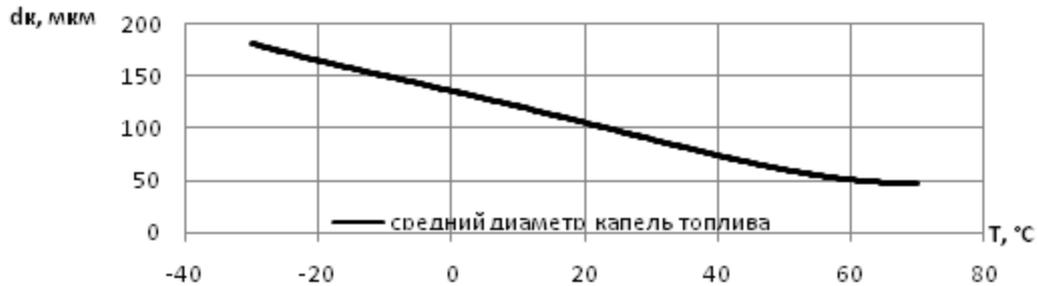


Рисунок 2.9 - Зависимость средних диаметров капель от температуры топлива

### 2.5.5. Оценка влияния физических параметров топлива на угол рассеивания топливной струи

Наиболее интенсивно идут процессы испарения и смесеобразования распыленного топлива на основном участке развития струи (при малоизменяющемся угле раскрытия струи возрастает ее боковая поверхность по мере удаления от распылителя форсунки).

Критериальное уравнение определения угла раскрытия топливной струи на основном участке [52]

$$\beta_T = 2 \cdot \arctg(F_s \cdot W_e^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot j^{0,5}), \quad (2.78)$$

где  $F_s = 0,009$  – постоянный коэффициент.

$$tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right) = F_s \cdot W_e^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot j^{0,5}, \quad (2.79)$$

Распишем составляющие уравнения (2.79):

$$tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right) = F_s \left[ \left( \frac{B_{ц}}{mf_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}} \right)^2 \frac{d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T} \right]^{0,32} \cdot \left[ \frac{\mu_T^2}{d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma_T} \right]^{-0,07} \cdot \left[ \frac{\rho_a}{\rho_T} \right]^{0,5}, \quad (2.80)$$

После преобразований получим следующее уравнение:

$$tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right) = F_s \cdot C \cdot \rho_T^{-0,75} \cdot \sigma_T^{-0,25} \cdot \mu_T^{-0,14}, \quad (2.81)$$

где  $C$  – константа, включающая в себя все величины, неизменные для холодного и подогретого топлив.

Аналогично для струи подогретого топлива запишем:

$$tg\left(\frac{\beta_{TГ}}{2}\right) = F_s \cdot C \cdot \rho_{TГ}^{-0,75} \cdot \sigma_{TГ}^{-0,25} \cdot \mu_{TГ}^{-0,14}, \quad (2.82)$$

Оценка относительного изменения угла рассеивания топливной струи при переходе от холодного топлива к подогретому:

$$\frac{tg\left(\frac{\beta_{TГ}}{2}\right)}{tg\left(\frac{\beta_T}{2}\right)} = \left[ \frac{\rho_{TГ}}{\rho_T} \right]^{-0,75} \cdot \left[ \frac{\sigma_{TГ}}{\sigma_T} \right]^{-0,25} \cdot \left[ \frac{\mu_{TГ}}{\mu_T} \right]^{-0,14}, \quad (2.83)$$

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

При впрыскивании в цилиндр дизеля подогретого топлива, угол рассеивания топливной струи и ее боковая поверхность увеличиваются, что приведет к увеличению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения, а это, в свою очередь, положительно сказывается на пуске дизеля в условиях низких температур, т.к. этим достигается объемное смесеобразование.

### 2.5.6 Определение изменения температуры топлива при его продвижении по системе топливоподдачи

При подаче топлива по топливопроводам и каналам системы топливоподдачи необходимо учитывать нагрев топлива от сжатия.

При этом представляет интерес определить степень влияния на нагрев топлива таких факторов как величина дифференциального напора, подачи и адиабатического сжатия.

В работе [72] на основе выражения первого начала термодинамики было получено уравнение для расчета нагрева жидкости в насосе в следующем виде:

$$\Delta T = T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}} = \frac{v}{C_p} (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) \frac{1 - \eta}{\eta} + D_i (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) + \frac{v}{C_p} (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}), \quad (2.84)$$

где  $T_{\text{ВХ}}$ ,  $T_{\text{ВЫХ}}$  – температура топлива на входе и выходе из насоса;  $v$  – удельный объем топлива;  $C_p$  – удельная теплоемкость топлива;  $P_{\text{ВХ}}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}}$  – давление на входе и выходе из насоса;  $D_i$  – коэффициент Джоуля – Томсона.

Принимая во внимание характеристику  $(\eta - Q)$  в виде зависимости

$$\eta = k_1 Q - k_2 Q^2, \quad (2.85)$$

где  $Q$  – теплота;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты теплопередачи;

а также зависимость коэффициента Джоуля – Томсона от коэффициента температурного расширения

$$D_i = -\frac{v}{C_p} (1 - T \cdot \alpha), \quad (2.86)$$

формулу (2.86) можно преобразовать к виду

$$\Delta T = \frac{v}{C_p} (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) \left( \frac{1 - (k_1 Q - k_2 Q^2)}{k_1 Q - k_2 Q^2} + T \cdot \alpha \right) \quad (2.87)$$

В формуле (2.86) зависимость коэффициента объемного расширения  $\alpha$  удобно представить в виде двухчленной зависимости

$$\alpha = a_a + b_a \rho^2$$

где  $a_a$ ,  $b_a$  – коэффициенты аппроксимации.

Расчет коэффициентов  $a_a$  и  $b_a$  можно произвести, по пяти точкам табличной зависимости, приводимой в [72], применяя метод наименьших квадратов. При этом для расчета можно использовать систему двух линейных уравнений [72]

$$5a_a - \left( \sum_{i=1}^5 \rho_i^2 \right) b = \sum_{i=1}^5 a_{ai} \quad (2.88)$$

$$a_a \left( \sum_{i=1}^5 \rho_i^2 \right) - b_a \left( \sum_{i=1}^5 \rho_i^4 \right) = \sum_{i=1}^5 a_{ai} \cdot \rho_i^2 \quad (2.89)$$

В результате указанных расчетов для дизельного топлива была получена следующая зависимость

$$\alpha = 2,963 \cdot 10^{-3} - 3,035 \cdot 10^{-9} \frac{1}{V^2} \quad (2.90)$$

После подстановки зависимости (2.90) в формулу (2.87) получим искомую зависимость для расчета нагрева топлива в системе топливоподачи

$$\Delta T = \frac{v}{C_p} (P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) \left( \frac{1 - (k_1 Q - k_2 Q^2)}{k_1 Q - k_2 Q^2} + T (2,963 \cdot 10^{-3} - 3,035 \cdot 10^{-9} \frac{1}{v^2}) \right) \quad (2.91)$$

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. При этом для расчета коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  также используется система двух линейных уравнений [62]

$$k_1 \left( \sum_{i=1}^5 Q_i^2 \right) - k_2 \left( \sum_{i=1}^5 Q_i^3 \right) = \sum_{i=1}^5 \eta_i \cdot Q_i \quad (2.92)$$

$$k_1 \left( \sum_{i=1}^5 Q_i^3 \right) - k_2 \left( \sum_{i=1}^5 Q_i^4 \right) = \sum_{i=1}^5 \eta_i \cdot Q_i^2 \quad (2.93)$$

Расчет температуры топлива по уточненной математической модели Афиногенова В.И. и характеристик впрыскивания и распыливания топлива приведен в приложении Б.

## 2.6 Выводы по главе

В процессе разработки главы 2 диссертационного исследования сделаны выводы:

1. На основании анализа существующих представлений о физике процессов, происходящих при СВЧ нагреве топлива, а также проведения предварительного эксперимента по реализации СВЧ нагрева дизельного топлива установлена принципиальная возможность реализации СВЧ нагрева в системах ТП дизелей.

2. 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.

3. Разработана методика, позволяющая учесть изменение основных параметров распыливания ( $d_{кГ}$ ,  $L_{ТГ}$ ,  $\tau_{сГ}$ ,  $tg \beta_{ТГ}$ ) в зависимости от температуры ( $\Delta T$ ) топлива, при использовании СВЧ энергии для его нагрева

### **3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

#### **3.1 Постановка цели и задач экспериментального исследования**

Настоящее исследование имеет целью установить закономерности процесса повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний и оценить эффективность применения СВЧ нагрева топлива. Это связано с тем, что при выполнении вычислительного эксперимента результаты получены с принятыми допущениями и ограничениями реального процесса, с определенным приближением.

Для оценки соответствия этих данных реальному процессу, проводится экспериментальное исследование натурального образца. Сопоставление экспериментальных параметров применения СВЧ нагрева топлива, полученных во время моделирования, позволит сделать вывод об их адекватности.

На основании проведённого анализа литературы и результатов теоретического исследования сформулированы задачи экспериментального исследования:

создать экспериментальную установку и разработать методику экспериментального исследования;

проверить опытным путём результаты вычислительного эксперимента;

исследовать изменения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний;

установить закономерности изменения качества смесеобразования, времени пуска двигателя от параметров СВЧ нагрева топлива и окружающего воздуха;

проверить целесообразность применения способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур.

### 3.2 Экспериментальная установка

Для оценки практической возможности способа повышения качества смеси образования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур, разработана и изготовлена экспериментальная установка. Она оборудована необходимыми системами, устройствами и контрольно-измерительной аппаратурой, обеспечивающими проведение необходимых исследований.

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

#### **Установка СВЧ нагрева топлива**

Установка СВЧ нагрева топлива (рисунок 3.1) 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.

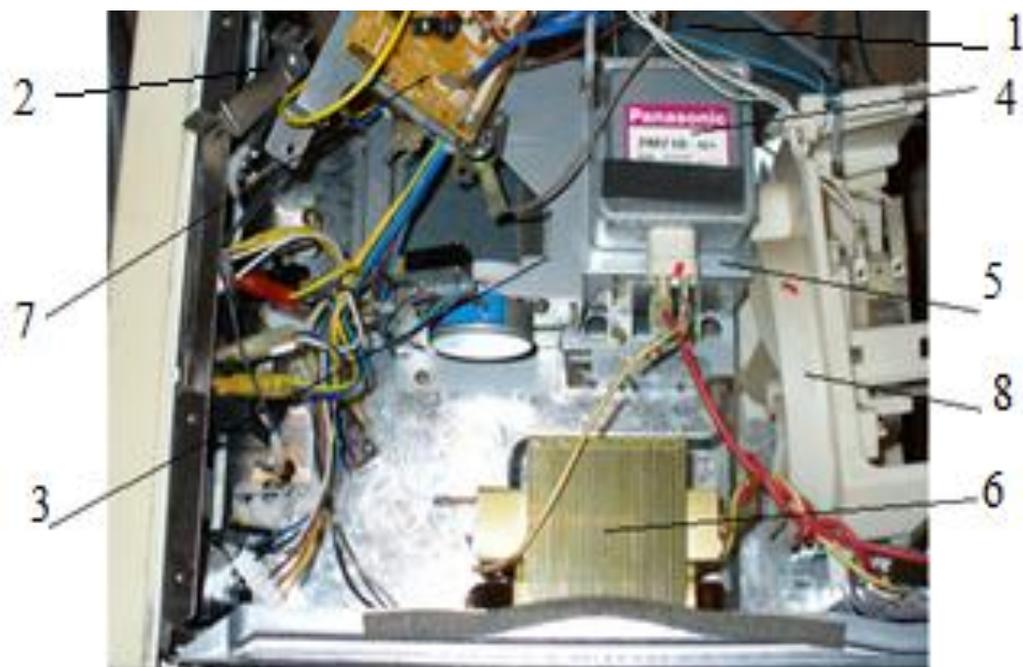


Рисунок 3.1 – Общий вид устройства СВЧ нагрева топлива:  
 1 - топливный насос высокого давления; 2 - форсунка; 3 - волновод (камера нагрева дизельного топлива); 4 - магнетрон; 5 - инвертор напряжения; 6 - трансформатор; 7 - блок управления; 8 - источник питания.

Блок управления предназначен для управления нагревом топлива в камере нагрева (волноводе). Функциональная схема блока управления представлена на рисунке 3.2.

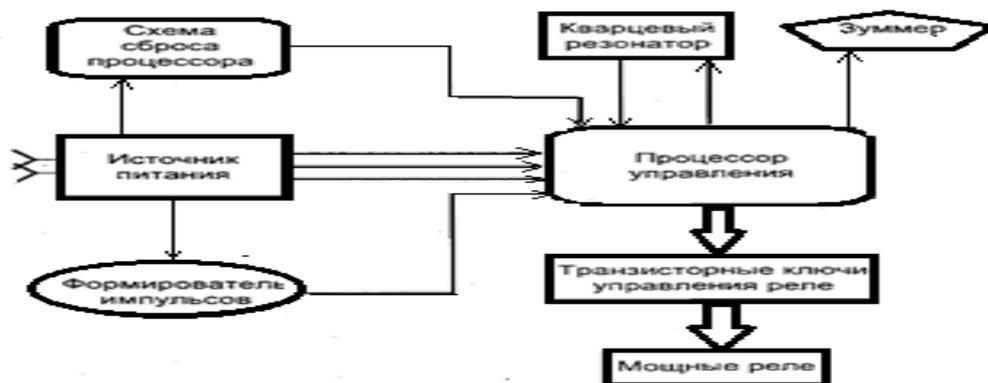


Рисунок 3.2 – Функциональная схема блока управления установки СВЧ

## нагрева топлива

В состав блока управления входят: процессор управления, источник питания, элементы кварцевого генератора, зуммер, ключи управления реле, формирователь импульсов, схема сброса процессора, замедляющее реле. Основой служит блок управления микроволновой печи фирмы SAMSUNG Его схема представлена на рисунке 3.3.

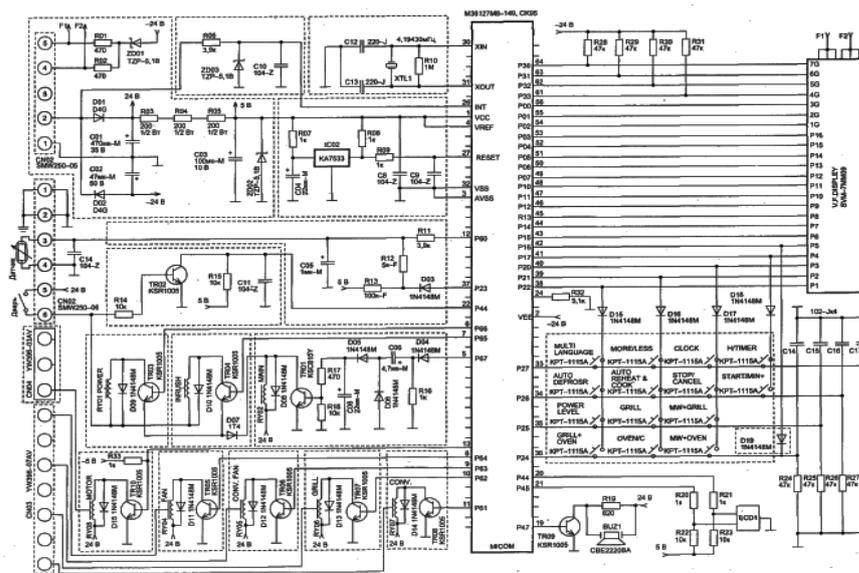


Рисунок 3.3 – Схема электрическая принципиальная блока управления устройством СВЧ нагрева топлива

Основу блока управления составляет процессор типа M38125M7-140. Процессор отвечает за индикацию, отсчет времени, включение магнетрона, выключение СВЧ генерации.

Выводы интегральной микросхемы процессора управления имеют следующее назначение:

- выводы 38...56 используются для управления индикатором;
- выводы 61 ...64 используются для управления сетками индикатора;
- вывод 19 — через него выдается сигнал включения зуммера;
- выводы 30 и 31 используются для подключения кварцевого резонатора с частотой 4,194304 МГц;

- вывод 28 — на него поступают импульсы с частотой 50 Гц от ограничителя на R06 и ZD03, которые используются для работы таймера;
- выводы 1,4 — питающее напряжение + 5 В;
- вывод 2 — питающее напряжение - 24 В;
- вывод 27 — вход сброса процессора управления, сигнал на который поступает от цепочки R07, C04 и интегральной микросхемы IC02;
- выводы 12 и 37 — используются для подключения температурного датчика (термистора);
- выводы 5...7, 8...11, 13 используются для управления через транзисторные ключи реле. Эти выводы потенциальные (т. е. включенному состоянию реле соответствует потенциал +5 В на соответствующем выводе), кроме вывода 5.

На вывод 5 выдается импульсный сигнал включения главного реле устройства СВЧ нагрева топлива.

Схема сброса блока управления обеспечивает сброс, т. е. приведение в исходное состояние процессора управления, как при включении источника питания, так и при превышении напряжения питания заданной величины.

Кварцевый генератор образуется усилителем процессора и кварцевым резонатором с частотой 4,194304 МГц.

Зуммер обеспечивает усилительный транзисторный каскад, работающий на пьезокерамический излучатель.

Формирователь импульсов преобразует синусоидальное сетевое напряжение в прямоугольные импульсы. Импульсы используются для работы таймера установки нагрева СВЧ, а также для включения и выключения реле, управляющего выходной мощностью в моменты «0» сетевого напряжения, для обеспечения сокращения помех, создаваемых устройством нагрева СВЧ, и увеличения срока службы контактов реле.

Замедляющее реле предназначено для уменьшения пускового тока при включении устройства нагрева СВЧ топлива и заряде высоковольтного конденсатора. Это реле после включения устройства включает последовательно с первичной обмоткой высоковольтного трансформатора резистор. По истечении 10 мс ре-

зистор включает реле, и устройство выходит на номинальный режим работы. Это реле способствует уменьшению выбросов тока в питающей сети и помех, создаваемых устройством нагрева СВЧ.

Камера нагрева топлива представляет собой прямоугольный волновод размерами 100x42x2 см. В камере нагрева топлива размещается электрический штырь магнетрона в максимуме электрического поля вдоль силовых линий поля, которым осуществляется вывод СВЧ энергии из магнетрона. Как показано на рисунке 3.4, согласование магнетрона с волноводом осуществляется путем подбора двух размеров: расстояние от штыря до стенки волновода  $d$  должно составлять ровно четверть длины волны; расстояние от штыря до противоположной стенки волновода  $L$  должно составлять ровно четверть длины волны. Расстояние от центра штыря магнетрона до противоположной стенки должно составлять 0,25 длины волны, поскольку при таком расстоянии будут суммироваться волны, излученные магнетроном и отраженные от стенки волновода. Таким образом, вся энергия, выработанная магнетроном, распространяется по волноводу, работающему в режиме бегущих волн.

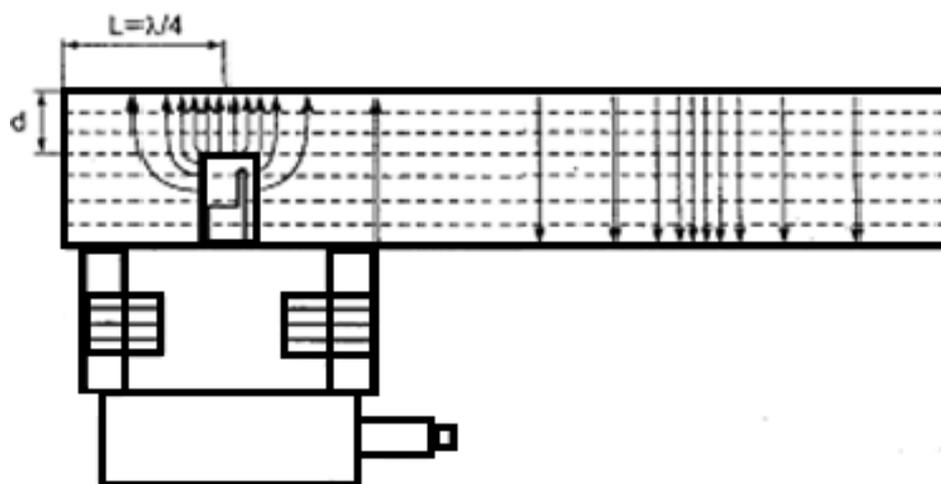


Рисунок 3.4 – Схема вывода электромагнитной энергии из магнетрона

Схема устройства и включения магнетрона представлена на рисунке 3.5

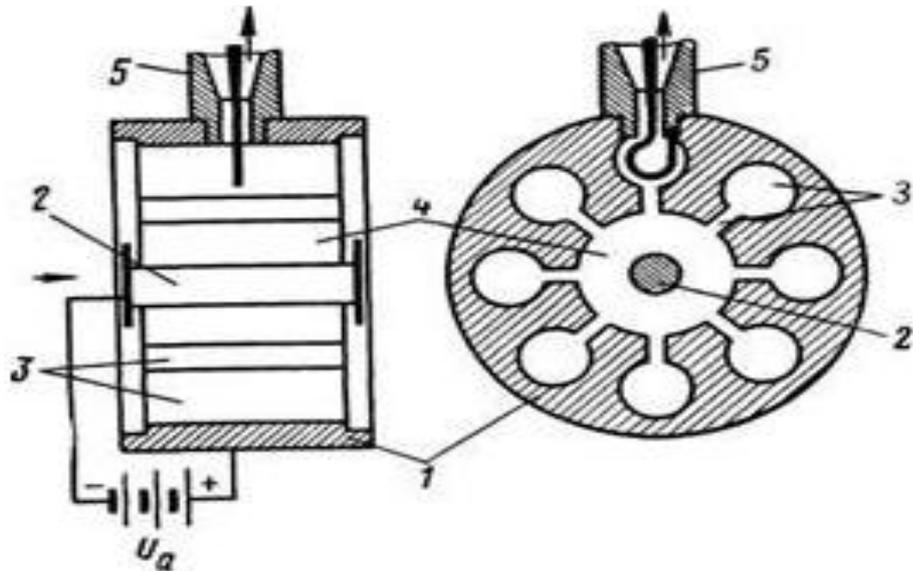


Рисунок 3.5 – Схема устройства и включения магнетронного генератора:

1– анодный блок; 2– катод; 3–резонатор типа щель – отверстие; 4 – пространство взаимодействия; 5 – вывод энергии



Рисунок 3.6 – Инвертор напряжения 24 В постоянного тока / 220 В переменного тока

Питание установки нагрева СВЧ осуществляется двумя аккумуляторами типа 6СТ140 через инвертор напряжения 24В постоянного тока/220В переменного тока мощностью 1500 Вт.

Инвертор напряжения (рисунок 3.6) предназначен для преобразования постоянного тока 24В, выдаваемого источником питания, в переменный ток 220В для питания установки СВЧ нагрева топлива.

Схема преобразователя постоянного напряжения 24 В в переменное 220 В приведена на рисунке 3.7.

Инвертор состоит из задающего генератора (симметричный мультивибратор на VT1, VT2) и силовой цепи (VT3...VT8). Инвертор работает следующим образом. После включения постоянного напряжения питания задающий генератор на VT1 и VT2 начинает генерировать управляющие импульсы. Эти импульсы через R5 и C3 подаются на одно плечо силовой цепи, а через R6 и C4 – на второе.

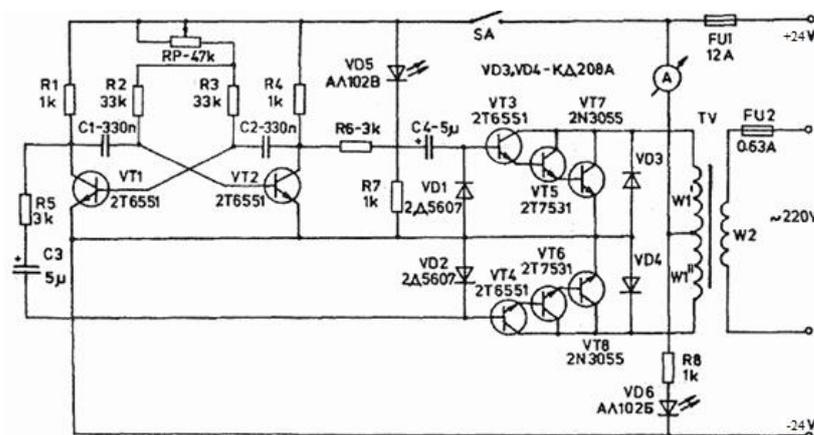


Рисунок 3.7 – Схема инвертора напряжения 24 В постоянного тока / 220 В переменного тока

Когда на коллекторе VT1 высокий уровень (логическая «1»), а на коллекторе VT2 низкий уровень («0»), транзисторы VT4, VT6 и VT8 открыты, и ток течет по цепи: «+» источника питания – обмотка W1 – переход коллектор-эмиттер транзистора VT8 – «-» источника питания. В этот момент транзисторы VT3, VT5 и VT7 закрыты.

В следующий момент на коллекторе VT2 будет «1», а на коллекторе VT1 – «0». Транзисторы VT3, VT5, VT7 открыты, и ток потечет по цепи: «+» источника питания – обмотка W1 – переход коллектор – эмиттер VT7 – «-» источ-

ника питания. Транзисторы VT4, VT6 и VT8 закрыты. Благодаря этому, к первичной обмотке выходного трансформатора прикладывается переменное напряжение прямоугольной формы, амплитуда которого примерно равна напряжению питания. Создаваемое в магнитопроводе магнитное поле индуцирует во вторичной обмотке электродвижущую силу, величина которой определяется числом витков вторичной обмотки W2. Диоды VD1 и VD2 служат для предотвращения выбросов напряжения отрицательной амплитуды при работе задающего генератора, а диоды VD3 и VD4 предохраняют от пробоя транзисторы в силовой цепи на холостом ходу (при отсутствии нагрузки во вторичной обмотке трансформатора).

Трансформатор TV намотан на магнитопроводе Ш 36 x 36. Обмотки W1' и W1" имеют по 28 витков провода ПЭЛ d2,1 мм (каждая), а обмотка W2 – 600 витков провода ПЭЛ d0,59 мм. Вначале намотана обмотка W2, а поверх нее – обмотки W1' и W2".

Устройство СВЧ нагрева топлива работает следующим образом.

Посредством подачи управляющего сигнала блока управления осуществляется подача к нити накала магнетрона высокого напряжения 4 кВ от аккумуляторной батареи через инвертор напряжения и трансформатор. Электромагнитная СВЧ волна, полученная с помощью магнетрона, поступает в полость камеры нагрева дизельного топлива (волновод). Осуществляется нагрев дизельного топлива, находящегося в камере нагрева дизельного топлива до заданной температуры. По достижении заданной температуры блок управления получает сигнал от датчика температуры (термистора), установленного в камере нагрева дизельного топлива, СВЧ - генерация отключается.

Для анализа диапазона изменения параметров СВЧ – установки велась регистрация температурных характеристик дизельного топлива. Экспериментальные данные фиксировались 8 датчиками температуры (термистор КМТ-1) в камере нагрева по методике, разработанной В.И. Афиногентовым [6].

**Стенд контроля характеристик впрыскивания и распыливания топлива.**

Для определения числовых характеристик впрыскивания и распыливания топлива форсункой был использован стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки топливных струй. Общий вид стенда представлен на рисунке 3.8

Стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки изображения топливных струй является приставкой к любому стенду настройки топливной аппаратуры (например, MOTOR PAL, MIRKEZ и ДД-1-03 и д.р.).



а

б

Рисунок 3.8 – Общий вид стенда контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки изображения топливных струй:

а - программно – аппаратный комплекс регистрации характеристик впрыскивания и распыливания топлива; б - стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки изображения топливных струй.

Стенд был дополнительно оснащен закопченной сажей пластиной из дюралюминия толщиной 1,5 мм и размером 120x140 мм, покрытой тонким слоем оксида магния, на держателе для исследования мелкости распыливания струи топлива на режиме пуска методом улавливания капель на пластину. Толщина слоя сажи при исследовании составляла 0,2-0,4 мм. При толщине слоя сажи, в 1,5-2 раза превышающей диаметр капли топлива, размер отпечатка может превышать размер капли не более, чем на 3 % [52, 72, 102, 104]. Напыление топлива на закоп-

ченную пластину производилось из распыляющего отверстия с расстояния 250 мм. На одну пластину производилось напыливание капель топлива, поданного за одно впрыскивание. Поэтому результаты по мелкости распыливания струи топлива получены средними за впрыскивание. Схема стенда представлена на рисунке 3.9

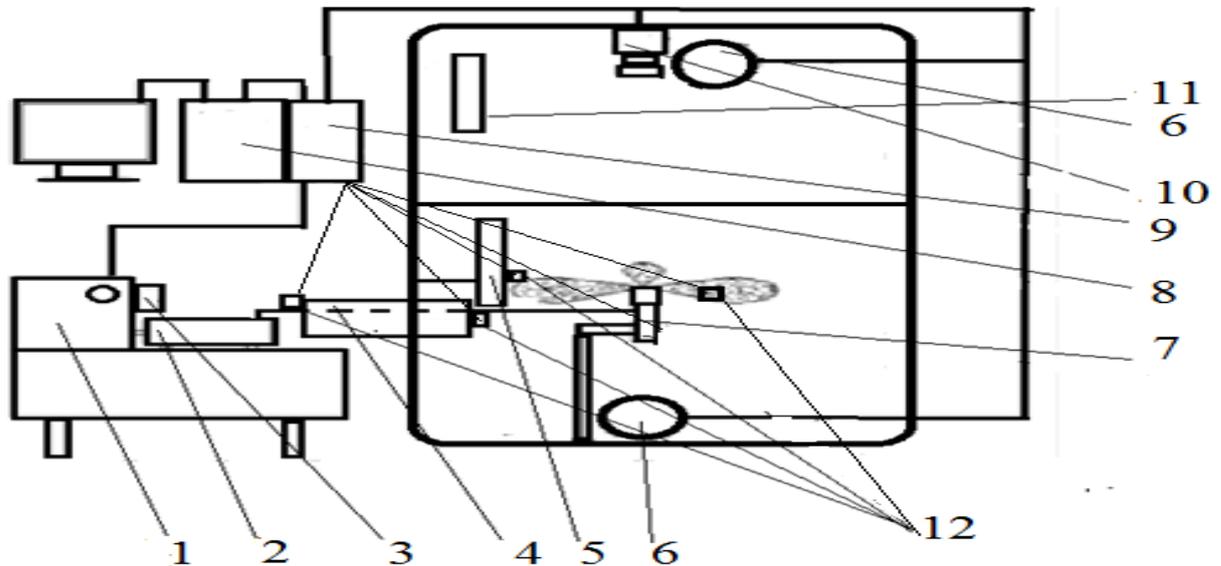


Рисунок 3.9 – Стенд контроля качества распылителей на основе скоростной съемки:

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

Регистрация параметров впрыскивания и распыливания топлива форсункой происходила следующим образом. Топливный стенд (1) вращает вал ТНВД (2), на котором укреплен оптический датчик вращения (3). Перед форсункой (7) расположена закопчённая пластинка (5). Топливопровод (4) подводит топливо к форсунке (7). Оптический датчик (3) вращения вала топливного насоса (2) подает синхрои импульс на управляющую ЭВМ (8), начинается отсчет времени до запуска

камеры СКС-1М (10) и блока освещения (6) в блоке синхронизации 9 (СИНХРО-М). Блок синхронизации (9) вырабатывает синхроимпульс съемки развития топливных струй от распылителя форсунки (7). Топливо подается в форсунку (7). По окончании процесса съемки информация передается в управляющую ЭВМ (8). В управляющей ЭВМ (8) разработанным программным комплексом «PRAST» определяются характеристики впрыскивания и распыливания топлива форсункой.

Исследования проводились с серийной форсункой КамАЗ.

Кинорегистрация струи топлива осуществлялась скоростной кинокамерой СКС-1М с частотой около 1000 кадров в секунду, что позволяло получать за время впрыскивания (20 – 25 мс) около 100 кадров. Кинорегистрация велась на киноплёнку, по результатам обработки которой определялись максимальное продвижение  $L$  струи топлива и максимальная ширина струи.

### **Камера холода и тепла**

В камере холода и тепла модели КХТ0-0,064/М (рисунок 3.10) производилось охлаждение дизельного топлива до заданных температур в соответствии с методикой эксперимента.

Основа системы управления камеры микропроцессорный регулятор измерителя с собственной энергонезависимой памятью. Контроль температуры топлива велся на ЭВМ через подключение по интерфейсу RS 485 (USB - порт).

Холодильная машина камеры - каскадная, на базе герметичных компрессоров «ASPERO» воздушного охлаждения. Холодильная автоматика, системы защиты и аварийного отключения основаны на базе комплектующих «Danfoss».



Рисунок 3.10 – Общий вид камеры холода и тепла модели КХТ0-0,064/М  
 Характеристики камеры тепла и холода представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Характеристики камеры холода и тепла КХТ-0,064/М

Диапазон воспроизводимой температуры		-75.....+155
Время достижения предельных значений воспроизводимой температуры		
нагрев до + 100 °С,	мин	20
охлаждение до – 70°С,	мин	60
Неравномерность распределения температуры в рабочем объеме,	°С	± 1,0
Точность поддержания температуры	°С	± 0,5
Объем рабочей зоны	л	64
Размер рабочей зоны	мм	400x400x400
Габаритные размеры (ШxГxВ)		900x1000x600
Технологическое отверстие.	Стандартное Ø100 мм.-1 шт	
Охлаждение компрессоров		Воздушное
Используемые хладагенты		Озонобезопасные R404,R23
Напряжение питания	В	380±10%
Максимальный потребляемый ток	А	8,5
Частота	Гц	50±1
Потребляемая мощность,	кВт	4,0
Общая масса камеры,	кг	150
Уровень шума на расстоянии 1 м,	дБ	55

### 3.3 Методика экспериментального исследования

Методика проведения настоящего исследования была составлена в соответствии с целью и задачами, решению которых посвящена работа, и представлена на рисунке 3.11.

**На первом этапе** - для определения оптимального распределения диаметров капель топлива и однородности распыливания топлива для обеспечения на-

дежного пуска дизеля в условиях низких температур исследовалась температура топлива в зависимости от изменения параметров установки СВЧ нагрева топлива при изменении температуры окружающего воздуха. Исследования проводились на дизельном топливе марки «З-0,2 минус 35».

Разработанная лабораторная установка позволяет изменять следующие основные факторы: мощность установки СВЧ нагрева топлива  $P$  - до 1,5 кВт, начальная температура топлива  $T$  – от минус 20 до минус 40°С, время воздействия  $\tau$  – от 60 до 90 с.

**На втором этапе** моторные исследования – оценивалась эффективность применения СВЧ нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур

Таким образом, для проведения первого и второго этапов исследований выбраны 3 независимых фактора.

Критериями оптимизации в соответствии с поставленными задачами стали:

- на 1- м этапе – распределение средних диаметров капель и однородности распыливания топлива в зависимости от его температуры;
- на 2- м этапе – эффективность применения СВЧ нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур.



Рисунок 3.11 – Методика проведения экспериментальных исследований

Проведенный анализ различных методов планирования экспериментов [18, 25, 35, 42, 50, 61, 74,75, 93, 94] показал, что реализация комбинаций всех возможных сочетаний уровней факторов и статистическая избыточность количества измерений, которая уменьшает влияние погрешностей отдельных измерений на оценку параметров, дает метод, описанный в работах [35, 94]. В связи с этим было принято решение планировать полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^3$ .

Математическая модель определялась в виде полинома первой степени [94]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.4)$$

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Уровни и интервалы планирования факторов

	Мощность установки СВЧ – нагрева топлива	Температура топлива начальная	Время воздействия
	$P$ , кВт	$T$ , К	$\tau$ , с
Основной уровень	1,0	243	90
Интервал варьирования	0,5	10	30
Нижний уровень	0,5	233	60
Верхний уровень	1,5	253	120

Обработка данных экспериментов по определению средних диаметров капель топлива.

Развернутая матрица планирования ПФЭ типа  $2^3$ , порядок проведения, план эксперимента и результаты опытов представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Порядок проведения, план эксперимента и результаты опытов

№ опыта	Факторы			Отклики			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y^1$	$y^2$	$y^3$	$y_{cp}$
1	+	+	+	56	60	51	55,67
2	-	+	+	73	68	79	73,33
3	+	-	+	64	59	70	64,33
4	-	-	+	83	89	92	88
5	+	+	-	79	71	83	77,67
6	-	+	-	76	62	80	72,67
7	+	-	-	79	86	89	84,67
8	-	-	-	98	110	107	105

Проверка однородности дисперсии.

Однородность дисперсии - это когда дисперсии изменений функций отклика в каждой точке опыта одинаковы.

Проверим однородность проведенного эксперимента по критерию Кохрена.

Определяем среднее значение измеряемой величины для каждого опыта [94]:

$$y_j = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m y_{ju}, \quad (3.5)$$

где  $i$  - номер опыта;

$m$  - количество повторений в каждом опыте,

Определяем дисперсию для каждого опыта по формуле [94]

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{ju} - y_j)^2. \quad (3.6)$$

По формуле (3.6) вычисляем дисперсию для каждого опыта

$S_1^2=20,33$ ;  $S_2^2=30,33$ ;  $S_3^2=36,5$ ;  $S_4^2=21$ ;  $S_5^2=40,01$ ;  $S_6^2=89,33$ ;  $S_7^2=26,33$ ;  
 $S_8^2=44$ .

Определяем сумму дисперсий [109]:

$$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 307,83.$$

Вычисляем расчетное значение критерия Кохрена [94]:

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum S_j^2}, \quad (3.7)$$

$$G_p = \frac{89,33}{307,83} = 0,29$$

Определяем числа степеней свободы

$f_1 = m-1$ ;  $f_2 = N$ , где  $f_1=2$ ;  $f_2=8$ .

Для уровня значимости  $q=0,05$  в таблице 3.5 находим  $G_{кр}=0,516$ . Так как экспериментальная величина  $G_p \leq G_{кр}$ , гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Таблица 3.5 – Критерий Кохрена

$f_2 = N$	$f_1 = m-1$			
	1	2	3	4
2	0,999	0,975	0,939	0,906
3	0,967	0,871	0,798	0,746
4	0,907	0,768	0,684	0,629
5	0,841	0,684	0,593	0,544
6	0,781	0,616	0,532	0,48
7	0,724	0,561	0,48	0,431
8	0,68	0,516	0,438	0,391
9	0,639	0,478	0,403	0,358
10	0,602	0,445	0,373	0,331

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии.

Определяем коэффициенты уравнения регрессии, которые находим методом наименьших квадратов с использованием расчетной таблицы 3.6.

Таблица 3.6 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

Номер опыта	$x_0$	Факторы			Отклики			$y_{cp}$
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_2x_3$	$x_1x_3$	
1	+	+	+	+	+	+	+	55,67
2	+	-	+	+	-	+	-	73,33
3	+	+	-	+	-	-	+	64,33
4	+	-	-	+	+	-	-	88
5	+	+	+	-	+	-	-	77,67
6	+	-	+	-	-	-	+	72,67
7	+	+	-	-	-	+	-	84,67
8	+	-	-	-	+	+	+	105

Коэффициенты уравнения регрессии находим по следующим формулам [94]

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad (3.8)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{uj} x_{ij} y_j. \quad (3.9)$$

где  $x_{ij}$  – значение  $i$ -го фактора в  $j$ -ом опыте;

$y_i$  – среднее значение отклика по повторным опытам.

$b_0 = 9,709$ ;  $b_1 = 7,083$ ;  $b_2 = 7,833$ ;  $b_3 = -7,335$ ;  $b_{12} = -7,516$ ;  $b_{13} = -3,25$ ;  
 $b_{23} = 2$ ;  $b_{123} = -2,45$ .

Определяем дисперсию воспроизводимости [109]

$$S_{\text{ВОСПР.}}^2 = \frac{1}{N} \sum S_j^2, \quad (3.10)$$

$$S_{\text{ВОСПР.}}^2 = 38,479.$$

Находим дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии [94]

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{1}{Nm}} S_{\text{ВОСПР.}}^2, \quad (3.11)$$

$$S_{bi} = 3,234$$

Определяем число степеней свободы  $f_3 = N(m-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$

Выбираем уровень значимости  $q=0,05$

По табличному значению определяем  $t_{\text{кр}}=2,12$  [117].

Для коэффициентов уравнения регрессии находим доверительный интервал

$$\Delta t_i = \pm t_{\text{кр}} S_{bi} \quad (3.12)$$

$$\Delta t_i = \pm 2,12 \cdot 3,234 = 6,856.$$

Коэффициенты  $b_1, b_2, b_3, b_{12}$  значимы, так как их абсолютная величина больше доверительного интервала. Так как при таком планировании все коэффициенты независимы, то незначимые коэффициенты отбрасываются без перерасчета остальных коэффициентов.

Таким образом, уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 9,709 + 7,083x_1 + 7,833x_2 - 7,335x_3 - 7,516x_1x_2, \quad (3.13)$$

Проверка адекватности модели.

Функция отклика, аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого найдены по методу наименьших квадратов, может не быть адекватной наблюдаемым значениям величины  $y$ .

Проверку адекватности математической модели выполняем по критерию Фишера (F-критерий).

Находим дисперсию адекватности [94]

$$S_{\text{АД}}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{j=1}^N (y_j - y_j^*)^2, \quad (3.14)$$

где  $l$  – число значимых коэффициентов регрессии;

$y_j$  – среднее значение в  $j$ -ом опыте;

$y_j^*$  – расчетное по уравнению регрессии значение отклика в  $i$ -ом опыте.

Определяем  $y_j^*$ :

$$y_1^*=57,483; y_2^*=70,089; y_3^*=67,001; y_4^*=92,879; \quad y_5^*=83,345; \quad y_6^*=75,432; \\ y_7^*=83,086; y_8^*=103,692.$$

$$S_{\text{АД}}^2 = 66,587$$

Определяем расчетное значение  $F$ -критерия Фишера (дисперсионное отношение) [109]

$$F_p = \frac{S_{\text{АД}}^2}{S_{\text{ВОСПР.}}^2}, \quad (3.15)$$

$$F_p = 1,73.$$

Находим числа степеней свободы

$$f_3 = N(m-1) = 8(3-1) = 16;$$

$$f_4 = N-l = 8-4 = 4.$$

Выбираем уровень значимости  $q=0,05$ .

По табличным данным и заданным значениям  $f_3=16$ ;  $f_4=4$  и  $q$  находим критическое значение параметра  $F_{\text{КР}} = 3$  [94].

Поскольку  $F_p < F_{\text{КР}}$  ( $1,73 < 3$ ), то полученная модель адекватна исследуемому объекту.

Обработка данных экспериментов по оценке однородности распыливания топлива

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 3.3. Развернутая матрица планирования ПФЭ типа  $2^3$ , порядок проведения, план эксперимента и результаты опытов представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Порядок проведения, план эксперимента и результаты опытов

Номер опыта	Факторы			Отклики			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y^1$	$y^2$	$y^3$	$y_{\text{ср}}$
1	+	+	+	1,14	1,18	1,21	1,177
2	-	+	+	1,32	1,37	1,35	1,347

Номер опыта	Факторы			Отклики			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y^1$	$y^2$	$y^3$	$y_{cp}$
3	+	-	+	1,21	1,27	1,25	1,243
4	-	-	+	1,49	1,44	1,41	1,447
5	+	+	-	1,17	1,21	1,2	1,193
6	-	+	-	1,27	1,32	1,29	1,293
7	+	-	-	1,28	1,29	1,25	1,273
8	-	-	-	1,49	1,48	1,44	1,47

Проверку однородности дисперсии проведенного эксперимента проводим по критерию Кохрена.

Определяем по формуле (3.5) среднее значение измеряемой величины для каждого опыта.

Определяем по формуле (3.6) дисперсию для каждого опыта

$S_1^2=0,0024$ ;  $S_2^2=0,0012$ ;  $S_3^2=0,0018$ ;  $S_4^2=0,0033$ ;  $S_5^2=0,0008$ ;  $S_6^2=0,0012$ ;  
 $S_7^2=0,0007$ ;  $S_8^2=0,0014$ .

Определяем сумму дисперсий

$$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 0,0128.$$

С помощью формулы (3.7) вычисляем значение критерия Кохрена

$$G_p = 0,1875.$$

Определяем числа степеней свободы

$$f_1 = m-1; f_2 = N, \text{ где } f_1=2; f_2=8.$$

Для уровня значимости  $q=0,05$  в таблице 3.5 находим  $G_{кр}=0,516$ . Так как экспериментальная величина  $G_p \leq G_{кр}$  ( $0,1875 < 0,516$ ), гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии.

Определяем коэффициенты уравнения регрессии, которые находят методом наименьших квадратов с использованием таблицы 3.9.

Таблица 3.9 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

Номер опыта	$x_0$	Факторы			Отклики			$y_{cp}$
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_2x_3$	$x_1x_3$	
1	+	+	+	+	+	+	+	1,177
2	+	-	+	+	-	+	-	1,347
3	+	+	-	+	-	-	+	1,243
4	+	-	-	+	+	-	-	1,447
5	+	+	+	-	+	-	-	1,193
6	+	-	+	-	-	-	+	1,293
7	+	+	-	-	-	+	-	1,273
8	+	-	-	-	+	+	+	1,47

Коэффициенты уравнения регрессии находим по формулам (3.8), (3.9):

$$b_0=0,0083; \quad b_1=0,0077; \quad b_2=0,0071; \quad b_3=-0,0023; \quad b_{12}=-0,0045; \quad b_{13}=0,0061; \\ b_{23}=0,0049; \quad b_{123}=0,0012.$$

Определяем дисперсию воспроизводимости по формуле (3.10)

$$S_{\text{ВОСПР.}}^2 = 0,016.$$

Находим по формуле (3.11) дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии

$$S_{bi} = 0,0033.$$

Определяем число степеней свободы  $f_3=N(m-1)=8 \cdot (3-1)=16$ .

Выбираем уровень значимости  $q=5\%$ .

По таблице 3.7 определяем  $t_{кр}=2,12$ .

Для коэффициентов уравнения регрессии по формуле (3.12) определяем доверительный интервал

$$\Delta t_i = 0,0069 .$$

Коэффициенты  $b_1=0,0077$ ;  $b_2=0,0071$  значимы, так как их абсолютная величина больше доверительного интервала. Незначимые коэффициенты отбрасываем без перерасчета остальных коэффициентов.

Таким образом, уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,0083 + 0,0077x_1 + 0,0077x_2 . \quad (3.16)$$

Проверка адекватности модели.

Проверку адекватности математической модели выполняем по критерию Фишера (F-критерий).

Находим дисперсию адекватности по формуле (3.14)

Определяем  $y_j^*$ :

$$y_1^*=1,191; y_2^*=1,343; y_3^*=1,251; y_4^*=1,456; y_5^*=1,188; y_6^*=1,286; y_7^*= 1,281; y_8^*=1,489.$$

$$S_{\text{АД}}^2 = 0,0086.$$

Определяем расчетное значение F-критерия Фишера по формуле (3.15)

$$F_p = 0,54.$$

Рассчитываем числа степеней свободы

$$f_3 = N(m-1) = 8(3-1) = 16;$$

$$f_4 = N-1 = 8 - 4 = 4.$$

Выбираем уровень значимости  $q = 0,05$ .

По табличным данным и заданным значениям  $f_3=16$ ;  $f_4=4$  и  $q$  находим критическое значение параметра  $F_{\text{кр}}$  [94].

Поскольку  $F_p < F_{кр}$  ( $0,54 < 3$ ), то полученная модель адекватна исследуемому объекту.

Таким образом, первый этап эксперимента позволил определить оптимальный состав и структуру системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива в соответствии с поставленными задачами; исследовать характеристики впрыскивания и распыливания топлива; оценить влияние величин мощности устройства СВЧ – нагрева топлива, температуры топлива, времени нагрева и их взаимодействие на средний диаметр капель топлива и однородность его распыливания.

**На втором этапе** оценивалась эффективность применения СВЧ нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур.

На пуск отводилось не более 5 попыток продолжительностью 15 с., с интервалом между ними в одну минуту. Если при первой попытке пуска появляются регулярные вспышки в цилиндрах двигателя, то допускается увеличение продолжительности попытки пуска, но при этом суммарное время вращения коленчатого вала не должно быть больше суммарной продолжительности двух попыток пуска [94].

Если пуск двигателя не осуществлялся, то считалось, что предпусковой разогрев недостаточен.

Факторами, влияющими на эффективность применения СВЧ нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур, в данном исследовании являлись параметры, от которых зависела надёжность пуска двигателя. В результате проведённого анализа установили, что такими параметрами являлись: температура окружающего воздуха; мощность СВЧ установки и время нагрева топлива с помощью СВЧ установки. Проведенные теоретические исследования, позволили определить, что для оценки эффективности применения СВЧ нагрева топлива при пуске дизеля в условиях низких температур необходимо использовать общепринятую методику планирования полнофакторного эксперимента (ПФЭ) [35, 42, 50, 61, 74, 75, 93, 94].

$$x_i + \frac{X_i - X_{i0}}{I_i}, \quad (3.17)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;

$x_i$  – натуральное значение фактора;

$x_{i0}$  – натуральное значение основного уровня;

$I_i$  – интервал варьирования;

$i$  – номер фактора.

По результатам экспериментальных данных находились значения коэффициентов уравнения регрессии, в том числе свободного члена и коэффициентов, характеризующих линейные эффекты и эффекты взаимодействия всех порядков [94].

Для трёх факторов определяются следующие коэффициенты уравнения:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.18)$$

где  $b_0$  – свободный член;

$b_1, b_2, b_3$  – линейные коэффициенты;

$b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коэффициенты парного взаимодействия;

$b_{123}$  – коэффициент тройного взаимодействия.

Влияние факторов оценивалось величиной линейных коэффициентов, а величина коэффициентов соответствует вкладу данного фактора.

Уровни интервалов варьирования выбирались по результатам предварительного исследования и априорной информации. При этом учитывалось, что в задачах интерполяции интервалов варьирования должна охватываться вся описываемая область [94].

Полученная матрица ПФЭ полностью отвечала требованиям симметричности, нормированности и ортогональности. Рандомизация опытов проводилась с использованием таблицы случайных величин [94].

Таблица 9 – План полнофакторного эксперимента с эффективными взаимо-

действиями

Номер опыта	Факторы								Значения отклика
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	
1	+	-	-	+	+	-	-	+	$Y_1$
2	+	-	-	-	-	-	+	+	$Y_2$
3	+	-	+	-	-	+	-	+	$Y_3$
4	+	-	+	+	+	+	+	+	$Y_4$
5	+	-	-	-	+	+	+	-	$Y_5$
6	+	-	-	+	-	+	-	-	$Y_6$
7	+	-	+	+	-	-	+	-	$Y_7$
8	+	-	+	-	+	-	-	-	$Y_8$

При проведении данного исследования автомобиль, выбранный для эксперимента, оборудовался разработанной системой предпускового разогрева элементов двигателя и проходил подконтрольную эксплуатацию с ежедневным контролем установленных параметров.

### 3.4 Оценка погрешности измерений

Оценка точности и определение ошибок измерений производились путём анализа источников погрешностей каждого наблюдения и измерения, а также расчета суммарной ошибки опыта.

Для исключения влияния систематических ошибок на результат экспериментальных данных все применяемые приборы были протарированы путем сверки с образцовыми [18, 34]. При подготовке к опытам изучались характер и величины их погрешностей, вводились поправки и устранялись вызывающие их причины. Кроме того, перед опытами систематически проводилась контрольная про-

верка показаний приборов.

Из теории ошибок следует, что частота проявления случайных ошибок различной величины подчиняется закону нормального распределения случайных погрешностей.

Из графика нормального распределения известно, что при большом числе измерений одинаковые по величине, но разные по знаку погрешности встречаются одинаково часто, а малые случайные погрешности встречаются чаще, чем большие.

Практически предельная величина ошибки  $\sigma_{\text{lim}}$  не превышает тройной квадратичной погрешности  $\sigma$ , т.е.

$$\sigma_{\text{lim}} \leq 3\sigma. \quad (3.19)$$

Погрешность, превышающая величину  $3\sigma$ , считается промахом. Вероятность погрешности  $\rho$  равна по величине  $2/3$  средней квадратичной погрешности:

$$\rho = 2/3\sigma. \quad (3.20)$$

На практике вероятностью погрешности принято пользоваться в качестве критерия точности измерения. Для конечного числа измерений среднюю квадратичную погрешность определяют по формуле:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n-1}} \quad (3.21)$$

где  $n$  – число измерений;

$\sigma_i$  – погрешность данного измерения.

Предел допустимой относительной погрешности прибора  $\delta_n$  в процентах определяется по формуле [34]:

$$\delta_n = \pm \frac{\Delta \Pi_{\text{пред}}}{A_n} 100\%, \quad (3.22)$$

где  $\Delta\Pi_{\text{пред}}$  – предел допустимой абсолютной погрешности измерительного прибора;

$A_{\text{п}}$  – показания прибора.

Величина  $\Delta\Pi_{\text{пред}}$  определяется через класс точности прибора  $\gamma$  и конечное значение его шкалы  $A_{\text{к}}$  по уравнению:

$$\Delta\Pi_{\text{пред}} = \pm \frac{1}{1000} A_{\text{к}} |\gamma|. \quad (3.23)$$

Погрешности средств измерения температуры рассматривались как совокупная погрешность термопары и регистрирующего прибора [18, 34].

Предел допустимой абсолютной погрешности температурного средства измерения вычислялся как:

$$\Delta\Pi_{\text{пред}} = \pm \sqrt{\Delta T_{\text{пред}}^2 + \Delta R\Pi_{\text{пред}}^2}$$

где  $\Delta T_{\text{пред}}$  – предел абсолютной погрешности термопары, который в диапазоне от минус 50 до плюс 100 °С составляет 2 °С;

$\Delta R\Pi_{\text{пред}}$  – предел абсолютной погрешности регистрирующего прибора.

Погрешность потенциометра КСП-4 соответствует классу 0,5 [18, 34]. Основная погрешность показаний не превышает  $\pm 0,5\%$  от диапазона измерения по шкале и составляет  $\pm 2$  °С ( $\Delta t_1$ ).

Погрешность стандартных хромель-копелевых термопар находится в пределах  $\pm 0,2$  МВ или  $\pm 2,16$  °С ( $\Delta t_2$ ) (ГОСТ 3044-84), значит, суммарная средняя квадратическая (теоретическая) погрешность измерительной системы составляла:

$$\sum \Delta\Pi = \pm \sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2} = \pm \sqrt{2^2 + 2,16^2} = \pm 2,9^\circ\text{C}.$$

То есть абсолютная погрешность измерения температуры охлаждающей жидкости, элементов двигателя и масла находилась в пределах 2,9°С.

Фактическая ошибка всей измерительной системы может быть меньше предельной суммарной теоретической абсолютной среднеквадратической погрешности вследствие вероятности взаимного уничтожения случайных ошибок непосредственно измеряемых величин [34].

Перед началом исследований была проведена экспериментальная фактическая оценка абсолютной погрешности измерительной системы «термопара - потенциометр». Термопары погружались в ванну с моторным маслом. Масло в ванне разогревалось на электроплите с включенным в ее электрическую цепь регулируемым реостатом. Выдержка при каждом замере составляла пять минут. Температура замерялась одновременно системой «термопара - потенциометр» и ртутным лабораторным термометром с ценой деления  $1^{\circ}\text{C}$  и погрешностью цены деления  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Замер температуры проводился через каждые  $10^{\circ}\text{C}$ . По разнице показаний температуры на шкале потенциометра определялась погрешность измерительной системы, составившая  $1,5...2,0^{\circ}\text{C}$ . Также были оценены суммарные погрешности измерений  $n, P_m, G_{ж}, I_{ст}, M_{кр}, r, p_o, t_o, \rho_o$ .

Относительная погрешность косвенных измерений определялась по уравнению [34]:

$$\xi = + \frac{dv}{V} = d(\ln V), \quad (3.24)$$

где  $V$  – исследуемая величина, являющаяся функцией нескольких независимых переменных  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , определяемых в результате прямых измерений.

### 3.5 Оценка адекватности математической модели

Прежде чем приступить к проведению эксперимента, необходимо убедиться в том, что планируемые опыты воспроизводимы.

Достоверность и точность полученных экспериментальных данных оценивается статистическими методами, изложенными в работах [18, 94]. В характерные моменты времени находились оценки математических ожиданий параметров исследуемых процессов:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.25)$$

где  $x_i$  – значение параметров в  $i$ -ом замере;

$n$  – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях.

После этого вычисляется оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов:

$$D = \sigma^2 = \frac{1}{n-1} [\sum_{i=1}^n X_i^2 - (n\bar{X})^2]. \quad (3.26)$$

При выполнении расчетов, необходимо знать значение их средней ошибки или среднеарифметического значения среднеквадратического отклонения:

$$\sigma_o = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.27)$$

Для малой выборки доверительный интервал равен:

$$\mu_{cm} = \sigma_o \alpha_{cm}, \quad (3.28)$$

где  $\mu_{ct}$  – коэффициент Стьюдента (при доверительной вероятности  $p_d=0,95$  и числе измерений  $n = 3$ ,  $\alpha_{ct} = 4,3 / 90, 104$ ).

Зная  $\mu_{ct}$ , можно вычислить действительное значение изучаемой величины для малой выборки:

$$X_o = \bar{X} \pm \mu_{cm}. \quad (3.29)$$

Достоверность данных, т.е. принадлежность их к одной генеральной совокупности оценивалась методом, базирующимся на использовании доверительного

интервала. При наличии статистического ряда малой выборки, подчиняющейся закону нормального распределения, определялись критерии появления грубых ошибок по формулам:

$$\beta_{max} = \frac{(X_{max} - \bar{X})}{\sqrt{\sigma(n-1)/n}},$$

$$\beta_{min} = \frac{(\bar{X} - X_{min})}{\sqrt{\sigma(n-1)/n}}. \quad (3.30)$$

где  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  – наибольшее и наименьшее значение из  $n$  измерений;

$\beta_{кр}$  – табличное значение критерия появления грубых ошибок.

Если табличное значение критерия появления грубых ошибок удовлетворяло условиям  $\beta_{max} > \beta_{кр}$  или  $\beta_{min} < \beta_{кр}$ , то значения  $x_{max}$  и  $x_{min}$ , соответственно, исключались, из результатов измерений, и производилось уточнение оценок распределения случайной величины. После исключения грубых ошибок определялись новые значения  $x$  и  $\sigma$  из  $(n-1)$  и  $(n-2)$  измерений.

Относительная погрешность результатов серии измерений при заданной достоверной вероятности ( $p_d=0,95$ ) оценивалась по зависимости:

$$\sigma = \frac{\mu_{cm}}{X} 100. \quad (3.31)$$

Проверка воспроизводимости результатов эксперимента выполнялась с использованием критерия Кохрена по условию:

$$k_{кр} = \frac{D_{i max} k_{km}}{\sum_{i=1}^m D_i}, \quad (3.32)$$

где  $D_{i max}$  – наибольшее значение дисперсии;

$\sum_{i=1}^m D_i$  – сумма дисперсии;

$m$  – число серий опытов;

$K_{кр}$  – расчетное значение критерия Кохрена;

$K_{кт}$  – табличное значение критерия Кохрена [94] при заданной достоверной вероятности и числе степеней свободы:  $q=n-1$  ( $K_{кт}=0,51$  при  $q=8$  и  $p_d=0,95$ ).

При выполнении условия (3.32) эксперимент признается воспроизводимым. Расчетное значение критерия Кохрена для всех регистрировавшихся параметров не превышал значения  $K_{кр} = 0,36$ . Так как  $0,36 < 0,51$  то измерения в эксперименте следует считать воспроизводимым.

Зная ошибку опыта, можно выявить пригодность модели, проверив ее адекватность. Эту проверку осуществляли с помощью критерия Фишера [18, 94]. При этом уравнения регрессии считались адекватными, если выполнялось условие:

$$F_p \leq F. \quad (3.33)$$

где  $F$  – табличное значение критерия Фишера, определялось по приложению;

$F_p$  – расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{\sigma_{da}^2}{\sigma_y^2}, \quad (3.34)$$

где  $\sigma_y^2$  – дисперсия опытных данных;

$\sigma_{da}^2$  – оценка дисперсии адекватности:

$$\sigma_{da}^2 = \frac{1}{m-b} \sum_{i=1}^n (X_i^e - X_i^p)^2. \quad (3.35)$$

где  $b$  – число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая и свободный член;

$x_i^e, x_i^p$  – значения функции отклика, полученные соответственно экспериментально в результате  $i$ -го опыта и расчетным путем.

Для отыскания табличного значения критерия Фишера, необходимо знать числа степеней свободы  $q_1 = q_{ад}$  и  $q_2 = q_y$ , связанные с числителем и знаменателем выражения (3.34).

Число степеней свободы  $q_{ад}$  при этом определяется по уравнению:

$$q_{ад} = m - b, \quad (3.36)$$

а число степеней свободы  $q_y$  определяется:

$$q_{ад} = m(n - 1). \quad (3.37)$$

В соответствии с программой эксперимента и планом его проведения дисперсия опытных данных равна 0,735. Оценка дисперсии адекватности составила 1,35, а расчётное значение критерия Фишера по уравнению (3.34) 0,54. Теоретическое значение критерия Фишера с установленными степенями свободы равно 5,9, то есть  $F_p = 0,54 < 5,9 = F$ , и модель адекватна, хорошо описывает изучаемый процесс с доверительной вероятностью 0,95.

Данная процедура статистического оценивания выполнялась для всех регистрируемых параметров на всех режимах предпускового разогрева двигателя.

### 3.6 Выводы по главе

1. 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.

**ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

**4.1 Анализ параметров системы топливоподачи с установкой СВЧ  
нагрева топлива**

**Результаты исследования СВЧ нагрева топлива**

Первоначально эксперименты проводились с целью определения допустимых параметров устройства СВЧ нагрева топлива.

Результаты эксперимента, полученные при мощности устройства до  $P_{\text{СВЧ}} = 0,5$  кВт и времени нагрева  $\tau < 60$  с при температуре топлива  $t$  ниже минус  $20^{\circ}\text{C}$  показали, что при данных величинах достичь желаемых результатов по СВЧ нагреву топлива не удастся. На рисунке 4.1 изображен график, характеризующий нагрев топлива при вышеуказанных параметрах.

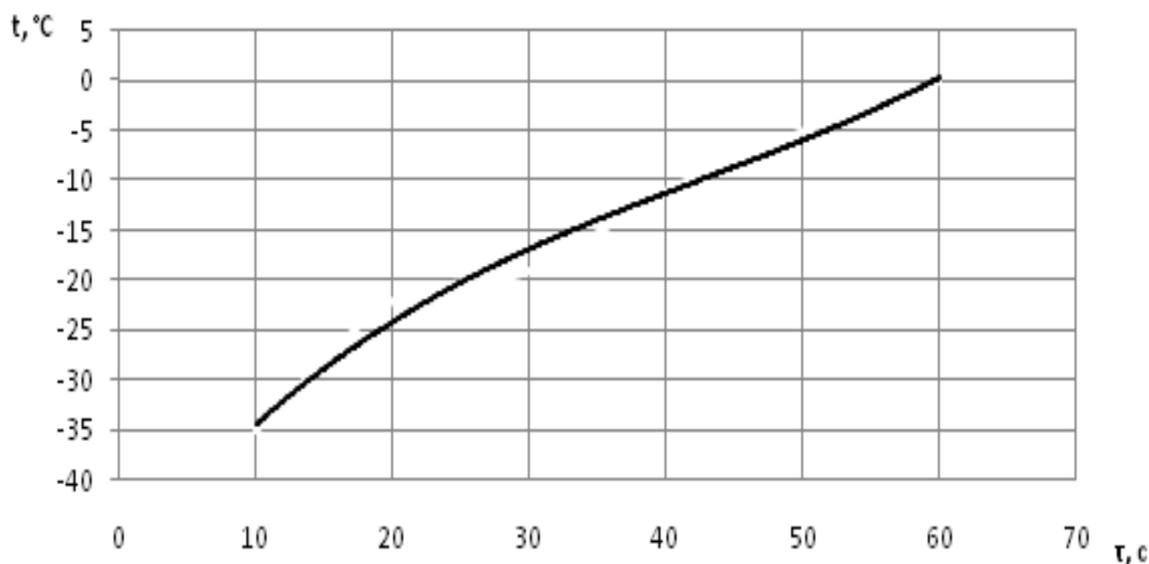


Рисунок 4.1 - Зависимость температуры топлива от времени СВЧ нагрева при

$$P_{\text{СВЧ}} = 0,5 \text{ кВт}$$

При корректировании параметров устройства до  $P_{\text{СВЧ}} = 1,0$  кВт, времени нагрева  $\tau$  не менее 60 с были получены удовлетворительные результаты, приведенные на рисунке 4.2

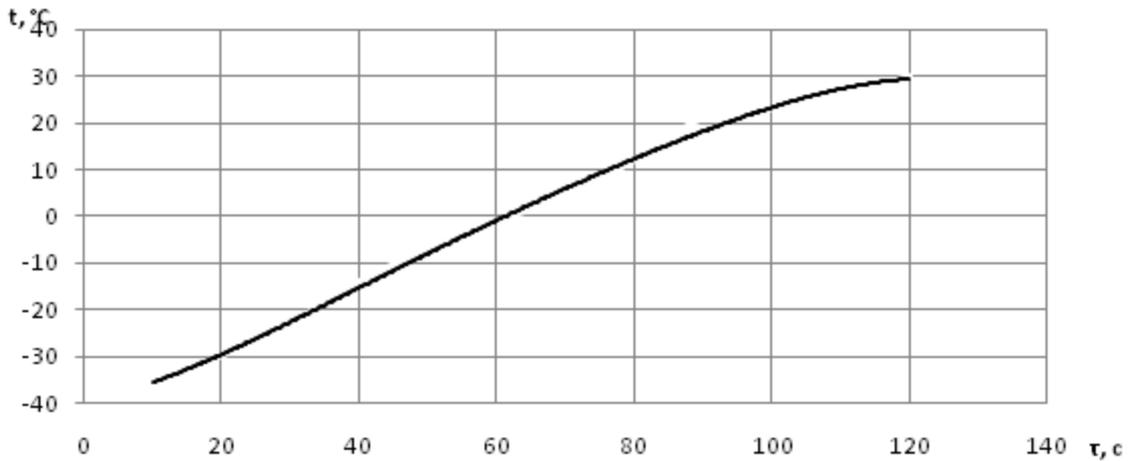


Рисунок 4.2 – Зависимость температуры топлива от времени СВЧ нагрева при  $P_{\text{СВЧ}}=1,0$  кВт

Наиболее оптимальных результатов, приведенных на рисунке 4.3 удалось добиться при  $P_{\text{СВЧ}}=1,5$  кВт и времени нагрева  $\tau=60$  с.

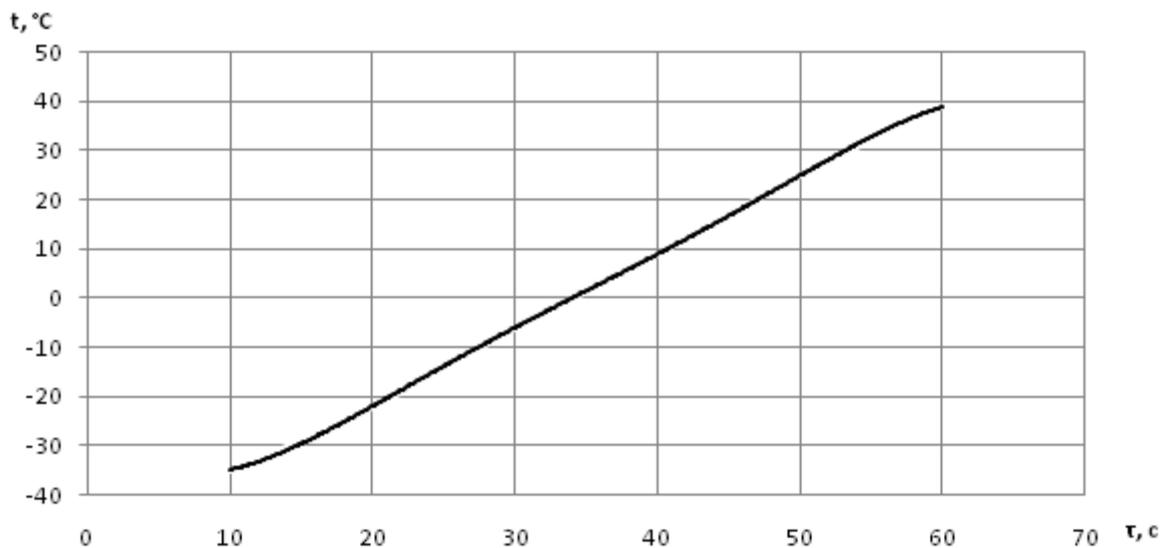


Рисунок 4.3 – Зависимость температуры топлива от времени СВЧ нагрева при  $P_{\text{СВЧ}} = 1,5$  кВт

В результате комплексного влияния конвективных теплопотерь и нагрева топлива от сжатия при продвижении топлива в системе топливоподдачи его температура увеличивается на 4°C.

На основании выполненных экспериментов можно сделать вывод о том, что получение наиболее оптимального СВЧ нагрева топлива возможно при  $P_{\text{СВЧ}} = 1,5 \text{ кВт}$  и времени нагрева  $\tau = 60 \text{ с}$ .

Результаты исследования характеристик впрыскивания и распыливания топлива поведены в приложении В.

В процессе обработки данных, полученных при регистрации характеристик впрыскивания и распыливания топлива на втором этапе безмоторных исследований, построены сравнительные зависимости характеристик от варьируемых факторов (рисунки 4.4, 4.5, 4.6).

На рисунках 4.4 и 4.5 показаны зависимости среднего диаметра капель топлива от времени нагрева и мощности источника СВЧ излучения при первоначальной температуре топлива минус  $10^\circ\text{C}$  и минус  $35^\circ\text{C}$  соответственно.

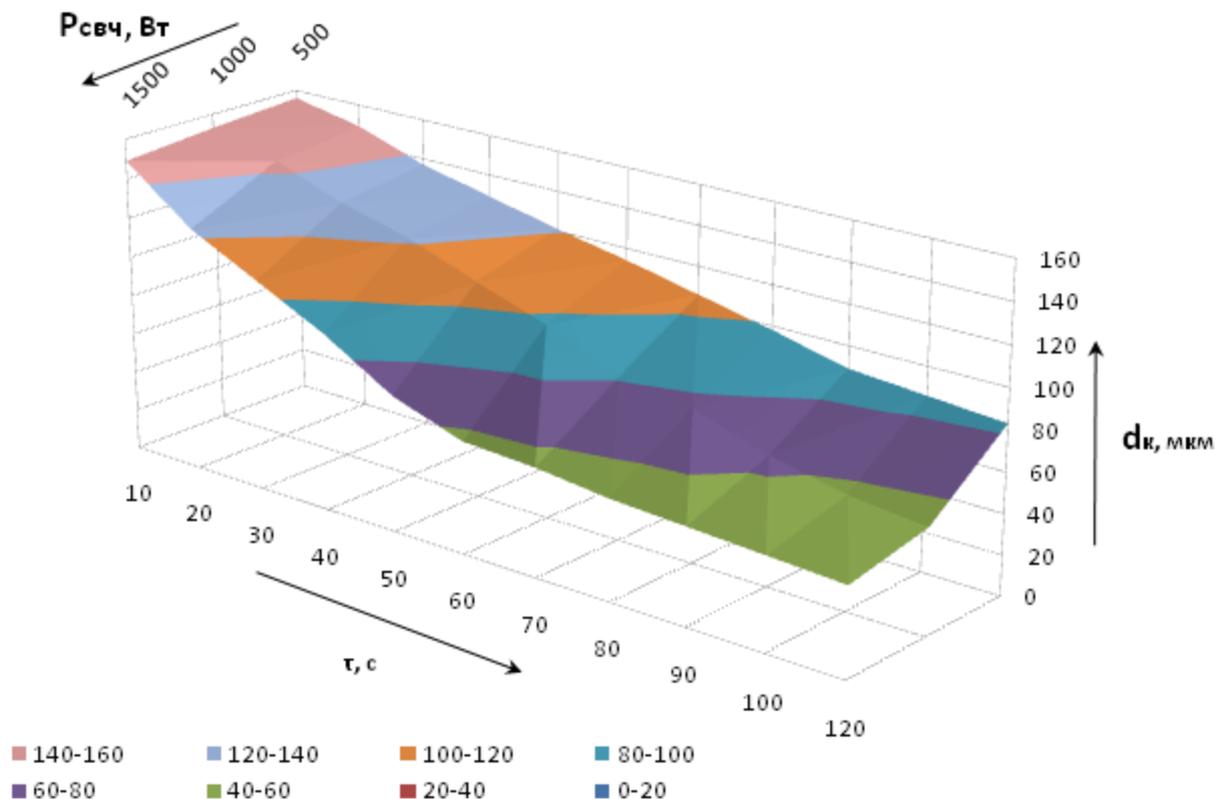


Рисунок 4.4 – Характеристика диаметра капель  $d_k$  от мощности источника  $P_{\text{СВЧ}}$  и времени нагрева  $\tau$  при  $t$  – минус  $10^\circ\text{C}$

В ходе исследования установлено, что наиболее существенное влияние на оптимизацию среднего диаметра капель топлива и однородность распыливания

топлива оказывают мощность устройства СВЧ и время нагрева. С понижением первоначальной температуры топлива, определяемой температурой окружающего воздуха, в период нагрева топлива до 20 – 30 с и, в особенности, снижением мощности СВЧ излучения до 500 Вт средний диаметр каплей топлива уменьшается незначительно. Это связано с тем, что в начальный период нагрева, пока топливо остается холодным, практически отсутствует конвективный теплообмен в камере нагрева топлива.

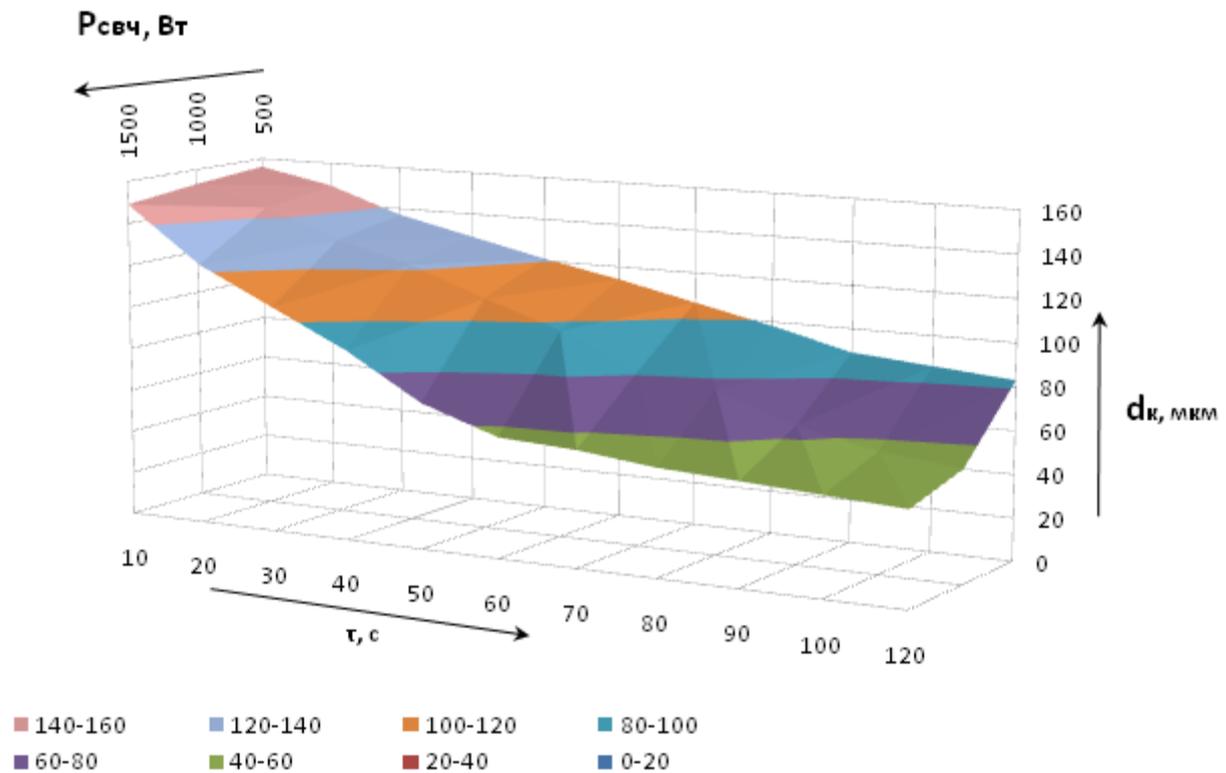


Рисунок 4.5 - Характеристика  $d_k$  от  $P_{\text{СВЧ}}$  и  $\tau$  при  $t - \text{минус } 35^\circ\text{C}$

С ростом температуры топлива увеличивается однородность его распыливания (рисунок 4.6). При этом коэффициент однородности  $\zeta$  стремится к 1 при мощности СВЧ излучения 1500 Вт и времени нагрева около 2 минут, однако при этом уже после 60 с нагрева коэффициент однородности  $\zeta$  находится в зоне оптимальных значений, поэтому отсутствует необходимость в дальнейшем нагреве топлива.

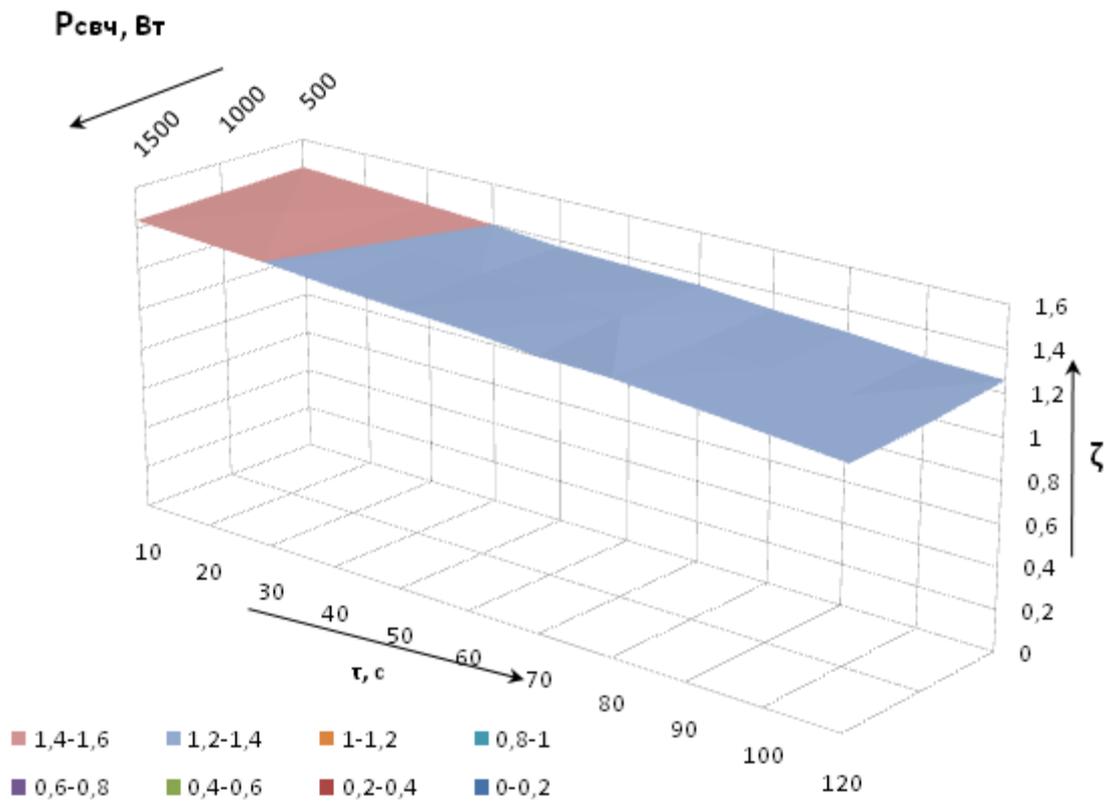
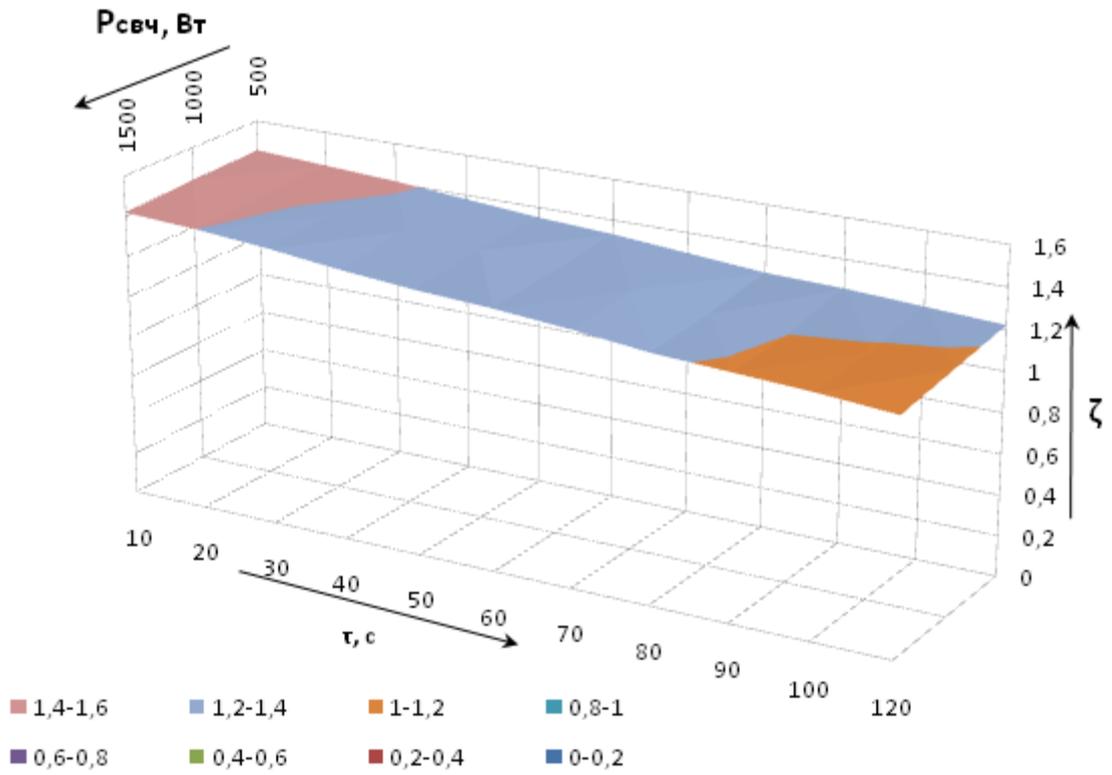


Рисунок 4.6 - Характеристика коэффициент однородности  $\zeta$  от мощности источника  $P_{свч}$  и времени нагрева  $\tau$  при  $t$ – минус 10 (1), минус 35 °C(2).

В результате обработки данных, полученных при регистрации вероятности пуска дизеля в условиях низких температур на втором этапе моторных исследований, построена зависимость характеристик от варьируемых факторов (рисунок 4.7).

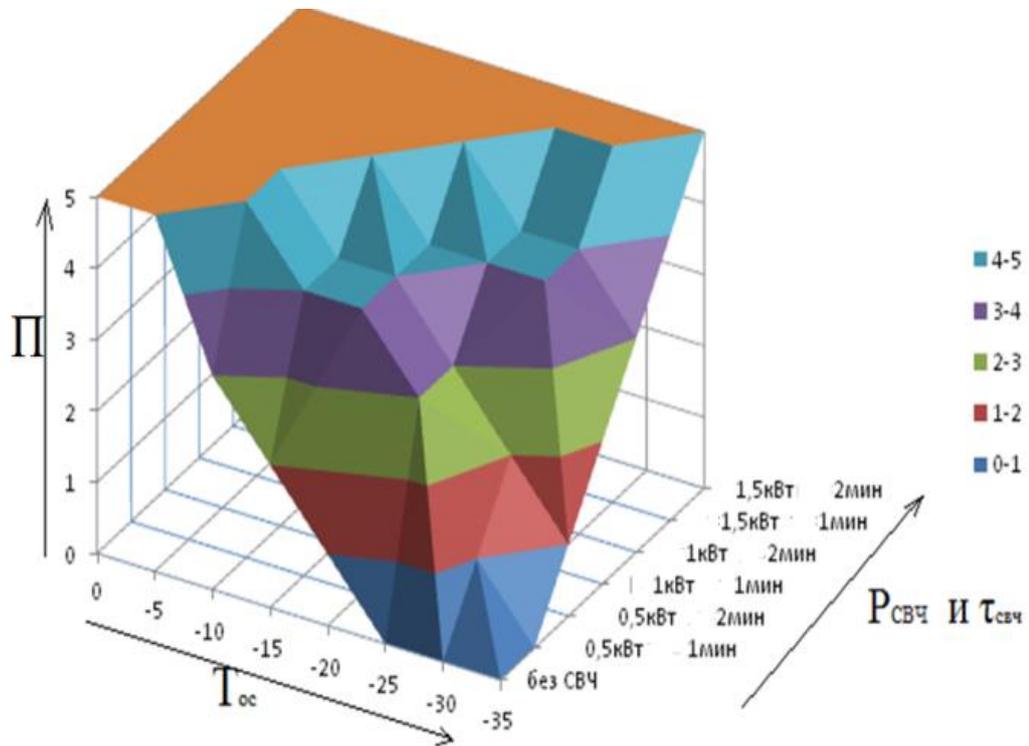


Рисунок 4.7 – Зависимость количества попыток пуска дизеля от температуры окружающей среды, мощности и времени воздействия СВЧ источника

#### 4.2 Способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить зависимость надежного пуска дизеля от характеристик топливоподачи, а именно параметров впрыскивания и распыливания топлива, и определить наибольшую

лее эффективный метод обеспечения надежного пуска дизеля по условиям топливоподачи и сокращение времени на подготовку к пуску при низких температурах окружающего воздуха: СВЧ нагрев дизельного топлива.

Время, затрачиваемое на пуск дизеля, складывается из времени подготовки к работе средств облегчения пуска; времени работы средств, облегчающих пуск дизеля; непосредственно времени пуска и времени выхода на режим полной нагрузки. Сокращение времени пуска дизеля возможно за счет уменьшения времени, затрачиваемого на подготовку к работе и работу средств, облегчающих пуск двигателя. Практически это выполнимо путем применения СВЧ нагрева дизельного топлива [79].

Способ ускоренного пуска дизеля заключается: в сокращении времени на подготовку к пуску за счет нагрева дизельного топлива с помощью СВЧ – излучения до температуры, позволяющей получение оптимальных параметров впрыскивания и распыливания топлива в цилиндре в период пуска.

Требованиями к устройствам облегчения пуска холодного двигателя [29] предусматривается, что:

- время подготовки к работе и приведения в действие устройства для облегчения пуска холодного двигателя (до включения стартера) не должно превышать 3 мин;

- устройство для облегчения пуска холодного двигателя должно обеспечивать возможность надежного сопровождения работы двигателя после его пуска в течение не менее 30 с.

Разработанный способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур представлен на рисунке 4.8.

**Способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур**

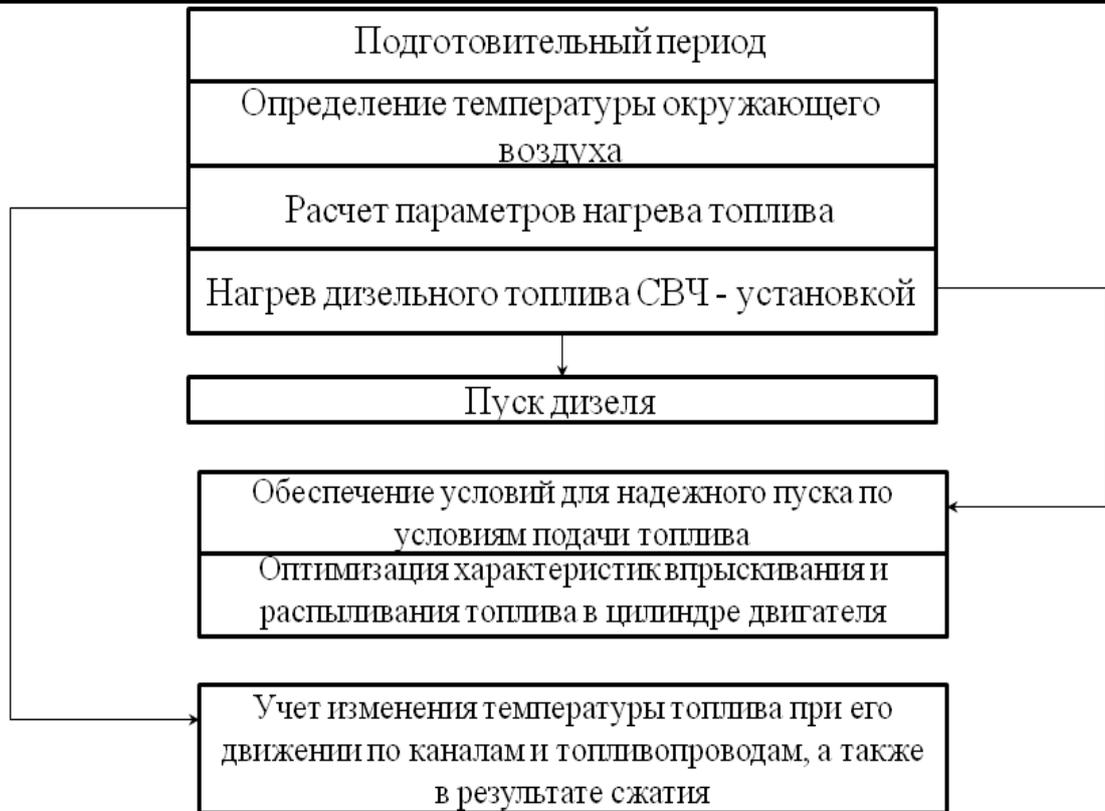


Рисунок 4.8 – Способ повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур

Выдвинутая гипотеза, что повышение качества смесеобразования при пуске дизеля в условиях низких температур возможно путем нагрева топлива с помощью СВЧ колебания.

### 4.3 Состав и структура системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования применения СВЧ нагрева топлива позволяют обосновать состав и структуру системы топливоподачи дизеля МТ с устройством СВЧ – нагрева топлива.

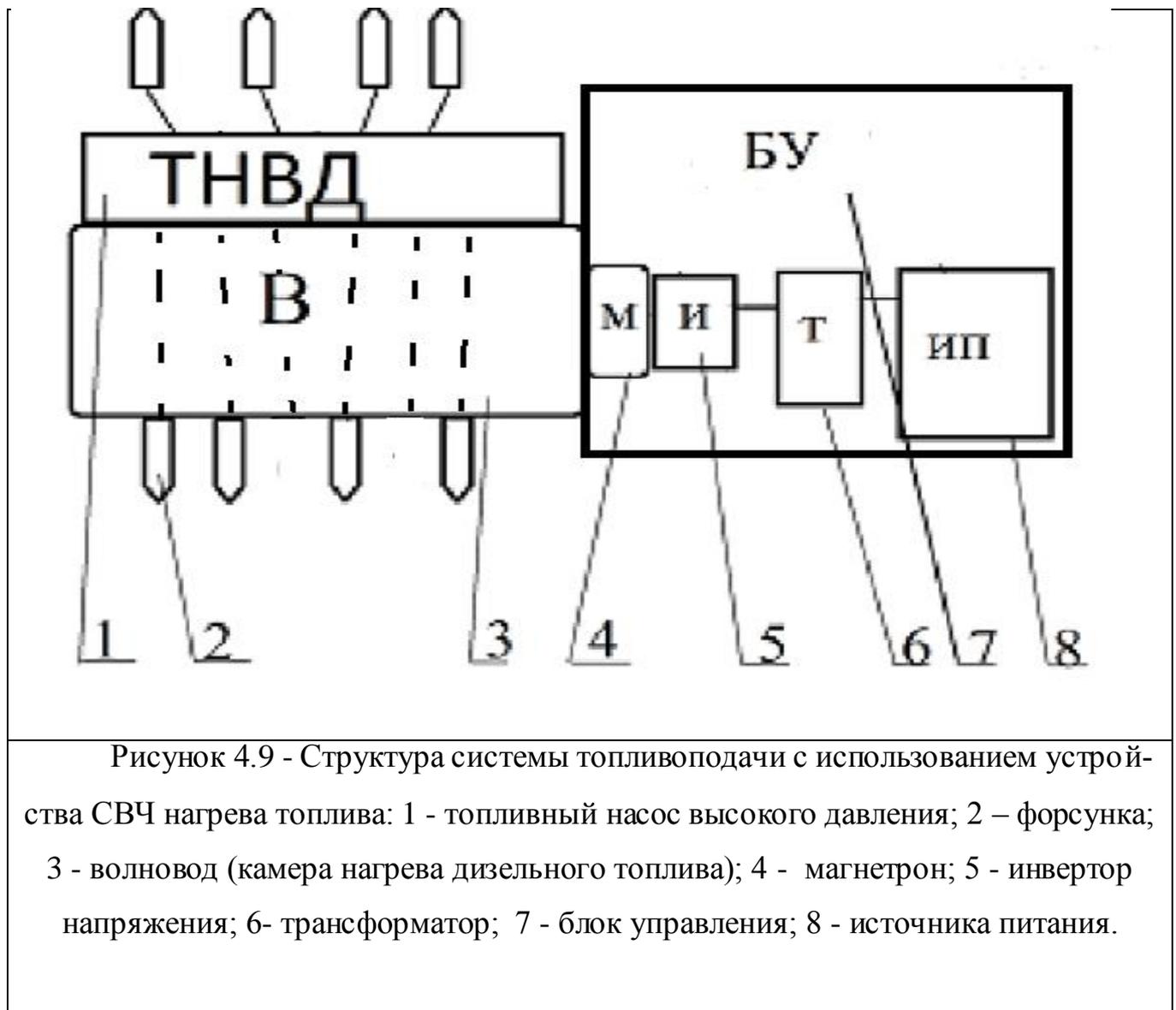
Состав системы топливоподачи с устройством СВЧ – нагрева топлива представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Состав системы топливоподачи с устройством СВЧ – нагрева топлива

№ п/п	Состав	Назначение	Примечание
1	Блок синхронизации	Обеспечивает: - согласование работы системы топливоподачи с устройством СВЧ нагрева топлива; - автоматическое переключение с работы устройства СВЧ нагрева топлива на штатный режим работы	Согласно ограничениям не рассматривается
2	Блок управления	Обеспечивает: - подачу электропитания на магнетрон через инвертор напряжения и высоковольтный блок питания; - подачу управляемого сигнала для изменения характеристик нагрева топлива; - подачу управляемого сигнала для открытия и закрытия электромагнитных клапанов для поступления топлива в камеру нагрева топлива и подачу топлива в топливоподкачивающий насос и далее к топливному насосу высокого давления	
3	Инвертор напряжения	Обеспечивает: преобразование постоянного напряжения 24 В от бортовой сети автомобиля в переменное напряжение 220 В для питания магнетрона	
4	Высоковольтный блок питания	Обеспечивает: подачу постоянного анодного напряжения на магнетрон $U_a = 4.0$ кВ и переменное напряжение накала 3.15 В.	Конструктивно блок питания состоит из трансформатора, диода и конденсатора и собран по схеме удвоения напря-

№ п/п	Состав	Назначение	Примечание
			жения
5	Магнетрон	Обеспечивает: генерацию СВЧ энергии в волноводе	
6	Волновод (камера нагрева топлива)	Обеспечивает: Нагрев топлива за счет поглощения СВЧ - энергии	

Структура системы топливоподдачи с использованием устройства СВЧ нагрева топлива представлена на рисунке 4.9.



#### 4.4 Оценка технико-экономической эффективности способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур

Техническая оценка предлагаемого способа на основе СВЧ нагрева топлива произведена на основе сравнения временных интервалов подготовки к работе и работы существующих средств облегчения пуска и разработанного устройства и на основе оценки влияния на вероятность пуска [29, 40, 43, 63, 83].

Оценка времени на подготовку к работе и работу устройств облегчения пуска дизеля представлена в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Оценка времени на подготовку к работе и работу устройств облегчения пуска дизеля

№ п/п	Устройство облегчения пуска	Время подготовки устройства к работе, мин	Время работы устройства, мин	Примечание
1	Свечи накаливания	-	До 0,25	не позволяют обеспечить надежный пуск дизеля при температурах ниже минус 20
2	Электрофакельные подогреватели воздуха во впускном трубопроводе	-	1,17—1,83	время от момента включения ЭФУ до загорания контрольной лампы при отрицательной температуре воздуха
3	Пусковые приспособления с использованием легковоспламеняющихся жидкостей	до 2	-	Сложность конструкции, в случае повреждения их пулями и осколками приводит к возгоранию
4	Электрические подогреватели	-	до 30	
5	ТЭН	-	20 - 30	
6	Индивидуальные предпусковые подогреватели	-	до 30	
7	Системы пуска дизеля с использованием сжатого воздуха на ВАТ	-	-	Ограниченное количество пусков, переохлаждение стенок цилиндров и камер сгорания при расширении

				ВВОДИМОГО В НИХ СЖАТОГО ВОЗДУХА
8	Устройство СВЧ нагрева топлива	-	1	

Из таблицы 4.2 видно, что устройство СВЧ нагрева топлива позволяет сократить время, затрачиваемое на подготовку к работе и работу устройств облегчения пуска дизеля по сравнению с используемыми устройствами на величину от 15% и более.

Таким образом, вероятность пуска МТ при использовании способа повышения качества смесеобразования на основе СВЧ нагрева топлива повышается за счет достижения следующих показателей:

- отсутствия времени, необходимого на подготовку устройства облегчения пуска;
- уменьшения времени, затрачиваемого на работу устройств облегчения пуска.

Стоимость разработанной топливной аппаратуры составляет 15 546 руб. Расчет стоимости системы топливоподдачи с устройством СВЧ – нагрева топлива при условии серийного производства с учетом нормативного коэффициента экономической эффективности определяется выражением [58]

$$C_k = C_p \times K, \quad (4.2)$$

$$C_k = 15546 \times 0,15 = 2332$$

Учитывая затраты на установку устройства СВЧ – нагрева топлива определим общую стоимость как

$$C_{ТА} = C_k + Z_{\Sigma k}, \quad (4.3)$$

$$C_{ТА} = 2332 + 1105 = 3437 \text{ руб.}$$

где  $C_k$  – стоимость одного комплекта оборудования, руб;

$Z_{\Sigma k}$  – затраты на установку, руб.

Основными марками АТ в организации ППВВ являются автомобили марок КамАЗ – 301 ед. и Урал – 160 ед. Общие затраты на установку устройства СВЧ – нагрева топлива  $Z_{но}$  на дизели АТ для организации ППВВ, составят

$$Z_{\text{но}} = N_{\text{АТ}} \cdot C_{\text{ТА}}, \quad (4.4)$$

$$Z_{\text{но}} = (301 + 160) \cdot 3437 = 1584411 \text{ руб}$$

где  $N_{\text{АТ}}$  – количество АТ на которые устанавливается новая ТА.

Согласно цен заводов изготовителей (на апрель 2013 г.) стоимость автомобиля КамАЗ-43114 составляет 2304 тыс. рублей, Урал-4320 – 1900 тыс. рублей.

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

#### **4.5 Рекомендации по применению разработанного способа повышения качества смесеобразования за счет нагрева топлива с помощью СВЧ колебаний при пуске дизеля в условиях низких температур**

1. 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.

2. 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  $10^{\circ}\text{C}$  до минус  $20^{\circ}\text{C}$  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  $20^{\circ}\text{C}$  до минус  $35^{\circ}\text{C}$  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  $35^{\circ}\text{C}$  до минус  $55^{\circ}\text{C}$  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);

3. 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  $10^{\circ}\text{C}$  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  $35^{\circ}\text{C}$  до  $10^{\circ}\text{C}$  в 1,6 раза, что положительно сказывается при пуске дизеля в условиях низких температур;

– время СВЧ нагрева топлива для обеспечения пуска дизеля МТ типа Ка-

МАЗ-740 должно составлять не менее 60 с, мощность СВЧ – не менее 1,5 кВт.

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

#### 4.6. Выводы по главе

1. 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 %.

2. 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.

## 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 ( $d_{кГ}$ ,  $L_{ТГ}$ ,  $\tau_{сГ}$ ,  $tg_{\betaТГ}$ ) в зависимости от температуры ( $\Delta T$ ) 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 °С до минус 20 °С 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 °С до минус 35 °С 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 °С до минус 55 °С устройство СВЧ нагрева топлива целесообразно использовать совместно со 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  $10^0$  С 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  $35^0$  С до  $10^0$  С 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 СОКРАЩЕНИЙ, И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АБШ - автомобильные базовые шасси

АКБ - аккумуляторные батареи

АТ - автомобильная техника

ВМТ - верхняя мертвая точка

ДВС - двигатель внутреннего сгорания

МТ - мобильная техника

КС - камера сгорания

НМТ - нижняя мертвая точка

ППВВ - производственное предприятие водоснабжения и водоотведения

ПФЭ - полнофакторный эксперимент

СВЧ - сверхвысокочастотный

СППВТ - средства подвижности и передвижения вооружения и техники

ТА - топливная аппаратура

ТАВД - топливная аппаратура высокого давления

ТП - топливоподача

ТНВД - топливный насос высокого давления

ТО - техническое обслуживание

ТПН - топливоподкачивающий насос

ТУ - технические условия

УОВТ - угол опережения впрыскивания топлива

ЦПТ - цикловая подача топлива

ПЭВМ - персональная электронно-вычислительная машина

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Автомобильный справочник: пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
2. Анализ применения военной автомобильной техники в вооруженном конфликте в Чеченской республике и разработка предложений по совершенствованию и модернизации ВВТ с учетом боевого опыта: отчет о НИР (рабочие материалы п.2)/ 21 НИИИ МО РФ; рук. Никитин С.И.; исполн. Сернов В.А. - Бронницы, 1995. -103 с. - № 1/6149
3. **Андерсон, Д.** Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Том 1. [Текст] / Д. Андерсон, Дж. Теннехил, Р. Плетчер. - М.: Изд-во Мир, 1990. – 384 с.
4. **Астахов, И.В.** Подача и распыливание топлива в дизелях [Текст]/ И.В. Астахов. - М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.
5. **Астахов, И.В.** Практический метод оценки основных параметров процесса впрыска и топливной аппаратуры быстроходного дизеля [Текст] / И.В. Астахов // Автотракторные двигатели: сб.тр. – М., 1968. – С. 37–57.
6. **Афиногентов, В.И.** Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков [Текст] дис. ... доктора технических наук 05.13.18: утв. 08.06.07 / Казань: Издательство КГТУ им. Туполева А.Н., 2006. – С.25
7. **Балятинский, М.А.** Исследование теплового состояния дизеля при пуске. [Текст]/М.А. Балятинский, А.Г. Морозов // Труды ССХИ, т. XXX, Свердлов. 1973. – С. 69–80.
8. **Белов, М.П.** Двигатели армейских машин. Часть первая. Теория [Текст]/ Белов М.П., Бурячко В.Р., Акатов Е.И. Москва: Воениздат, 1971. – С.451 – 452
9. **Белоусов, А.Д.** О прогреве коренных подшипников при пуске тракторного дизеля в зимних условиях. [Текст] / А.Д. Белоусов, И.С. Белоусов, А.Ф. Кушнер // Труды Новосибирского СХИ, т.50,1972. – С. 53–58.

10. **Бергер, М.Н.** Прямоугольные волноводы с диэлектриками (справочные таблицы, графики, формулы)[Текст] / М.Н. Бергер, Б.Ю. Капилевич М.: Советское радио, 1973. – 256 с.
11. **Бережнов, Н.Г.** Основы эксплуатации машинно-тракторного парка в зимних условиях Западной Сибири [Текст] / Н.Г. Бережнов // Барнаул, 1975.
12. **Боровских, А.М.** Исследование момента сопротивления при запуске двигателя [Текст] / А.М. Боровских, А.Г. Морозов // Труды Свердловской СХИ, Т. 30, 1973. – С. 65–68.
13. **Брилинг, И.Р.** Исследование рабочего процесса и теплопередачи в двигателях дизеля [Текст] /И.Р. Брилинг// М., Л.: ГНТИ, 1981.
14. **Бурячко, В.Р.** Автомобильные двигатели: Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования [Текст] / В.Р. Бурячко, А.В. Гук. – СПб.: НПИКЦ, 2005. – С. 47–70, 101–120, 247–292.
15. **Бурячко, В.Р.** Военно-техничко-экономическая оценка силовых установок военной автомобильной техники [Текст] / В.Р. Бурячко. – Л.: ВОЛАТТ, 1995. – 368 с.
16. **Бурячко, В.Р.** Силовые установки и электрооборудование военной автомобильной техники [Текст] / В.Р. Бурячко. – Л.: ВОЛАТТ, 1985. – 440 с.
17. **Вамберский, М.В.** Передающие устройства СВЧ: учебное пособие для радиотехнических и специальных ВУЗов [Текст] / М.В. Вамберский, В.И. Казанцев, С.А. Шелухин - М.: Высшая школа, 1984. – 448 с.
18. **Веденяпин, В.В.** Общая методика оценки экспериментального исследования и обработки опытных данных [Текст] / В.В. Веденяпин. - М.: Наука, 1967. – 159 с.
19. **Вибе, И. И.** Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. - Свердловск: Машгиз, 1962. –272 с.
20. **Вихерт, М.М.** Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст] / М.М. Вихерт, М.В. Мазинг. - М.: Машиностроение, 1978. – 176с.

21. **Володин, А.И.** Моделирование на ЭВМ работы тепловозных дизелей [Текст] / А.И. Володин. -М.: Транспорт, 1985. – 216 с.
22. **Гатаулин, Н.А.** Модельный ряд дизелей КамАЗ [Текст] / Н.А. Гатаулин //Автомобильная промышленность. – 2006. - № 3. – С. 13-17.
23. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод [Текст]: учеб.пособие для студентов / Т.В. Артемьева, Т.М. Лысенко, А.Н. Румянцева, С.П. Стесин. - М.: «Академия», 2005. – 336 с.
24. **Глуханов, Н.П.** Физические основы высокочастотного нагрева [Текст]/ Н.П. Глуханов - Л.: Машиностроение, 1989. – 56 с.
25. **Гмурман, В.С.** Теория вероятности и математическая статистика [Текст] / В.С. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 324 с.
26. **ГОСТ 27.003-90.** Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности [Текст]. – Введ. 1992-01-01. –М. : Изд-во стандартов, 2007. – 19 с.
27. **ГОСТ 305-82.** Топливо дизельное. Технические условия [Текст]. - Введ. 1983-01-01. –М. : Изд-во стандартов, 2003. – 5 с.
28. **ГОСТ Р 53840-2010** Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Методы испытаний [Текст]. - Введ. 1992-01-01. –М.: Изд-во стандартов, 2011. – 19 с.
29. **ГОСТ Р 54120-2010** Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Технические требования [Текст]. – Введ. 1992-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 19 с.
30. **ГОСТ РВ 51218-98.** Дизели военных гусеничных машин. Общие технические требования [Текст]. - Введ. 1999-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1999. –20 с.
31. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.- 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 169, 183–187.

32. Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов и др.; под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова.- изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

33. Долгополое, Н.Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов [Текст]/ Н.Н. Долгополое, - М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. – С.47

34. Зайдель, А.Н. Погрешности измерения физических величин [Текст] / А.Н. Зайдель. - Л.: Наука, 1985. – 112 с.

35. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И.Г. Зедгинидзе. - М.: Наука, 1976. – 390 с.

36. Иванкина, О.П. Основы планирования эксперимента [Текст]: учеб. - метод. пособие для студентов и аспирантов / О.П. Иванкина. – Рязань: РИ МГОУ, 2001. – 82 с.

37. Иващенко, Н.А. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Н.А. Иващенко, С.И. Ефимов, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1985. – 456 с.

38. Карлинер, М.М. Электродинамика СВЧ (курс лекций) [Текст] /М.М. Карлинер, – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. унив-та, 1999. – 267 с.

39. Католик, В.М. Пусковые качества шестицилиндрового тракторного дизеля с неразделенной камерой сгорания. [Текст]/ Католик В.М. / «Тракторы и сельхозмашины» – М.: Машиностроение, 1968, № 2.

40. Квайт, С.М. Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей [Текст]/ С.М. Квайт, Я.А. Менделевич, Ю.П. Чижков. - Москва: Машиностроение, 1990.– С.256

41. Концепция сохранения и развития парка ВАТ, совершенствования системы АТО ВС РФ на период 2006-20015гг. [Текст]/ ГАБТУ МО РФ. 21НИИИ. – М.:2005. Инв. 006529. – 16 –102 с.

42. **Копылов, Ю.М.** Экспериментальное исследование процесса смазки тракторного двигателя при пуске в период его зимней эксплуатации. [Текст]/Копылов Ю.М. / Москва: ГосНИТИ, 1964 (труды ГосНИТИ, т.5).
43. **Костин, А.К.** Работа дизелей в условиях эксплуатации [Текст]: справочник / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев. – Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
44. **Круглов, М.Г.** Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие [Текст] / М.Г. Круглов, А.А. Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. - 360 с.
45. **Крутов, В.И.** Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст]/ В.И. Крутов, В.Е. Горбаневский, В.Г. Кислов. – М.: Машиностроение, 1985. – 208 с.
46. **Кутовой, В.А.** Впрыск топлива в дизелях [Текст]/ В.А. Кутовой. - Москва: Машиностроение, 1981. – С.43
47. **Лазарев, Е.А.** Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей: учебное пособие [Текст] / Е.А. Лазарев. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 360 с.
48. **Ландау, Л. Д.** Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц и др. («Теоретическая физика», том VI). – М.: 2006. –736 с
49. **Лебедев, И.В.** Техника и приборы СВЧ: учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы» [Текст] /Лебедев И.В М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
50. **Лецкий, Э.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / Э. Лецкий, К. Хартман, В. Шеффер. - М.: Мир, 1977. – 552 с.
51. **Лыков, А.В.** Тепло и массообмен в процессе сушки [Текст]/ А.В. Лыков. - М.: Госэнергоиздат, 1956. – С.120
52. **Лышевский, А.С.** Процессы распыливания топлива дизельными форсунками [Текст]/ А.С. Лышевский – М.: Госгортехиздат, 1962. – с.180

53. **Маначинский, А.С.** Балканы: военный аспект операции «Союзная сила» - уроки и последствия А.С. Маначинский [Текст]// Воздушно-космическая оборона.-2009.-№ 8.- С.11-14
54. **Марков, В.А.** Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях [Текст] / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.И. Мальчук/ – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 360 с.
55. **Марков, В.А.** Характеристики топливоподачи транспортных дизелей [Текст] / В.А. Марков, В.Г. Кислов, В.А. Хватов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 160 с.
56. **Матиевский, Д.Д.** Рабочие процессы в ДВС: учебное пособие [Текст]/ Д.Д. Матиевский. – Барнаул: Изд-во АлтПИ им. И.И.Ползунова,1983 – 84 с.
57. **Машковцев, Б.М.** Теория волноводов [Текст]/ М.Б. Машковцев, К.Н. Цибизов, Б.Ф. Емелин. – Ленинград: Наука, 1966. – 352 с.
58. **Мишин, М.Л.** Пуск автотракторных дизелей. [Текст]/ М.Л. Мишин. – Москва : Машгиз, 1948
59. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений: методическое пособие. [Текст]/ – М.: ВНИИПИ НПО «Поиск», 1986. – 51 с.
60. **Монин, А.С.** Статистическая гидромеханика: теория турбулентности [Текст]/ А.С. Монин, А.М. Яглом. - М.: Изд-во Наука, 1992. - 695 с.
61. **Морозов, Г. А.** Воздействия электромагнитных полей СВЧ на материальные среды. Современные проблемы и вопросы проектирования // Труды Международ. конф. «Теория и техника антенн. МКТГА-95». Т.1.Харьков, 21-23 ноября 1995.- С.35.
62. **Налимов, В.В.** Логическое основание планирования эксперимента [Текст] / В.В. Налимов, Т.И. Голикова. – М.: Металлургия, 1976. – 128 с.
63. **Нетушил, А.В.** Высокочастотный нагрев в электрическом поле [Текст]/ А.В. Нетушил и др. – М.: Высшая школа, 1961. – С.27–35, 120 – 146

64. **Оберемок, В.З.** Пуск автомобильных двигателей [Текст]/ В.З. Оберемок, И.М. Юрковский, – Москва: Транспорт, 1979.– С.118
65. Особенности пуска дизеля в условиях низких температур сб. науч. тр. и сообщ., спецвыпуск. – Рязань: РВАИ, 2010. – С. 123 – 127
66. Оценка работоспособности образцов ВВТ Сухопутных Войск по опыту Чеченского конфликта и разработка предложений по устранению выявленных недостатков [Текст]: отчет НТК СВ. – М.: – 175 с.
67. **Пат. 69928 Российская Федерация, МПК F 02 N 9/00.** Устройство для облегчения пуска двигателя внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Шапран, М.А.Савельев, Н.Л. Пузевич, А.Ю. Веревтин, Д.Ю. Козлов; заявитель и патентообладатель Рязанский военный автом. институт. – № 2007114318/22; заявл. 16.04.07; опубл. 10.01.08, Бюл. № 1. – 3 с.: ил.
68. **Патрахальцев, Н.Н.** Повышение эффективности пуска - разгона дизеля созданием начального давления топлива [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, А.В. Фомин // Респуб. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков, 1981. – С. 64-68.
69. **Патрин, А.Н.** Обеспечение стабильности впрыскивания совершенствованием топливной аппаратуры дизелей военной автомобильной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 20.02.14: защищена 12.10.95 : утв. 14.01.95 / А. Н. Патрин, – Рязань: РВАИ, 1995. – 241 с. – Библиогр.: С. 181–188.
70. **Подчинок, В.М.** Эксплуатация военной автомобильной техники. Часть 2 [Текст]/В.М.Подчинок. – Рязань: РВАИ, 1997.-Инв.№505.- С.3-14.
71. **Поликер, Б.Е.** Дизельные двигатели для агрегатов и электростанций [Текст]/ Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский, В.А. Марков, В.К. Васильев, Д.И. Буханец. Москва: Легион-Автодата, 2006. – С.187
72. **Портнов, Д.А.** Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия [Текст] / Д.А. Портнов. – М.: Машгиз, 1963. – 640
73. **Разлейцев, Н.Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980 - 169 с.
74. **Рогов, И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов [Текст]/И.А. Рогов – М.: Агропромиздат, 1988. – С.28

75. **Ромакин, М.И.** Математический аппарат оптимизационных задач [Текст] / М.И. Ромакин. – М.: Статистика, 1975. – 112 с.
76. **Рохвагер, А.Е.** Математическое планирование научно-технических исследований [Текст] / А.Е. Рохвагер, А.Ю. Шевяков. - М.: Наука, 1975 – 440 с.
77. **Свиридов, Н.В.** Улучшение эксплуатационных характеристик дизелей военной автомобильной техники [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 20.02.14: защищена 13.09.98: утв. 24.12.98 / Свиридов Николай Викторович; РВАИ. – Рязань, 1998. – 186 с. – Библиогр.: С. 171–177
78. **Свиридов, Ю.Б.** Топливо и топливоподача автомобильных дизелей [Текст] / Ю.Б. Свиридов и др. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
79. **Сеначин, П.К.** Моделирование процессов самовоспламенения и горения в ограниченных объемах и двигателях внутреннего сгорания [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.04.02 / Сеначин Павел Константинович. - Барнаул, 1998.-396 с.
80. **Смолин, А.А.** Использование СВЧ – нагрева топлива для обеспечения ускоренного и надежного пуска дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха /А.А. Смолин// Материалы 8-й Международной научно – практической конференции «Образование и наука без границ» Т 35. Прага – 2012 г. С.39 – 42.
81. **Смолин, А.А.** Влияние топлива на надежный пуск /А.А. Смолин// Материалы 8-й Международной научно –практической конференции «Образование и наука без границ» Т. 35. – Прага, 2012 – С.36 – 39.
82. **Смолин, А.А.** Влияния физических параметров топлива на угол расщепления 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.
83. **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.

84. **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.

85. **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.

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

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

88. **Смолин, А.А.** Определение изменения температуры топлива при его продвижении в системе топливоподачи // Материалы 8-й Международной технической научно –практической конференции «Научная индустрия европейского континента», Т. 25. – Прага, 2012 – С. 39 – 43.

89. **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.

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

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

92. **Соболь, И.М.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И.М. Соболь, Р.Б. Статников. - М.: Наука, 1981. – 112 с.

93. Современные театры военных действий [Текст]: Учебник для командных военно – учебных заведений. - Москва: Ордена Трудового Красного знамени Военное издательство министерства обороны СССР, 1979. – С.372 – 389

94. **Спиридонов, А.А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. - М.: Машиностроение, 1981. - 184 с.

95. **Стрелков, Д.Н.** Возможности применения СВЧ энергии в автомобильной технике // Материалы Всероссийской научно-технической конференции.- Т.1 – Электрон.текстовые, граф. дан (2,77 Мб). – Москва: ИЦ МАТИ, 2010. – с. 70. - 1 электрон.опт. диск (CD-ROM) : зв., цв. ; 12см. – Систем.требования: ПК 486 или выше ; 8 Мб ОЗУ ; Windows 3.1 или Windows 95 ; SVGA 32768 и более цв. ; 640x480 ; 4x CD-ROM дисковод ; 16-бит. зв. карта ; мышь. – Загл. с экрана. – Диск помещен в контейнер 20x14 см.

96. **Стрелков, Д.Н.** К проблеме обеспечения надежного пуска дизеля в условиях низких температур и возможности использования СВЧ нагрева топлива и моторного масла //Международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ»/ Д.Н. Стрелков. //Сборник материалов международной научно – технической конференции. – Электрон.текстовые, граф. дан (15,7 Мб). Москва: Изд – во МГТУ, 2011. – с. 208 - 215. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв. ; 12см. – Систем.требования: ПК 486 или выше ; 8 Мб ОЗУ ; Windows 3.1 или Windows 95 ; SVGA 32768 и более цв. ; 640x480 ; 4x CD-ROM дисковод ; 16-бит. зв. карта ; мышь. – Загл. с экрана. – Диск помещен в контейнер 20x14 см.

97. **Стрелков, Д.Н.** Обеспечение прокачиваемости дизельного топлива и влияние вязкости масла на пуск дизеля в условиях низких температур Международная научно – практическая конференция / Д.Н. Стрелков. // Сборник материа-

лов международной научно – практической конференции. Юго – Западный гос. Университет, г. Курск, 2011. – С.48 ISBN 978-5-9902675-9-6

98. **Стрелков, Д.Н.** Перспективные способы обеспечения пуска дизеля в условиях низких / Д.Н. Стрелков. // Сборник научных трудов по материалам Международной научно – практической конференции. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес – Наука - Общество», 2011. – С.165

99. **Стрелков, Д.Н.** Применение СВЧ – нагрева для обеспечения надежного пуска дизеля Вестник Академии военных наук, вып.3 (32). – Москва: Изд-во ФГУП «Военное издательство МО РФ «Типография Воениздата», 2010. – С.334-336

100. **Стрелков, Д.Н.** Способы обеспечения надёжного пуска дизеля в условиях низких температур Актуальные вопросы современной техники и технологии / Д.Н. Стрелков. // Материалы II Международной научной заочной конференции. - Липецк: Изд-во «Де-факто», 2010.- С.91

101. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках [Текст] / Б.М. Галицейский, Ю.А. Рыжов, Е.В. Якуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.

102. Топливная аппаратура и системы управления дизелей [Текст]: Учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. - изд. 2-е. – М.: Легион-автодата, 2005. – 344 с.

103. Установка разогрева тяжелых нефтепродуктов в железнодорожных цистернах. Информационный листок №876. Дорожный центр информации и рекламы.- Нижний Новгород, 1996.

104. **Фанлейб, Б.Н.** Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст]: справочник /Б.Н. Фанлейб. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1990. – 352 с.

105. **Фомин, Ю.Я.** Топливная аппаратура дизелей [Текст] / Ю.Я. Фомин, Г.В. Никонов, В.Г. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.

106. **Чижков Ю.П.** Электростартерный пуск автотракторных двигателей [Текст] / Москва: Машиностроение, 1985. – С.5-8

107. AVL BOOST Cycle Simulation. Product description. AVL LIST GMBH. 2005.

108. **Deardorff, J.W.** A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers / J.W. Deardorff // J. Fluid Mech. - 1970. -№ 41,- P. 453-480.

109. Dr.-Ing.  
Hannover Reibungsanalyse bei Kaltstart einer Verbrennungskraftmaschine. [Текст] / Dr. - Ing, Horst Kruse // MTZ, 1965, v. 26, № 12, p. 497 - 504.

110. **Golovitchev, V.** 3-D Diesel Spray Simulations Using a New Detailed Chemistry Turbulent Combustion Model [Text] / V. Golovitchev, N. Nordin, R. Jarnicki, and J. Chomiak // CEC/SAE International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, 19-22 June 2000, Paris, France.

111. GT-POWER. The Industry Standard. Product description. Gamma Technologies. 2005.

112. **Heywood, J. B.** Internal Combustion Engine Fundamentals [Text] / J. B. Heywood. - McGraw-Hill Company, 1988. - 980 p.

113. IFP-C3D User Manual - Version 1.2 LMS Imagine

114. **Jennifer C. Beale.** MODELING SPRAY Atomization With The Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor Hybrid Model [Text] / Beale C. Jennifer, D. Rolf // Engine Research Center, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA

115. **Keiya, Nishida.** Simplified Three-Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a Di Diesel Engine [Text] / Nishida Keiya, Hiroyasu Hiroyuki // SAE Paper 890269, February 1989/

116. **MIL-PRF-62177D.** Detail specification. Engine, diesel: 12 cylinder, 90° V-type, 750 h.p., AVDS1790-2, AVDS1790-2A, AVDS1790-2C, AVDS1790-2D, AVDS1790-2DR, AVDS1790-2CA and AVDS1790-2DA

117. **Ogink, Roy.** Applications and Results of a User-Defined, Detailed-Chemistry HCCI Combustion Model in the AVL BOOST Cycle Simulation Code [Text] / Roy Ogink. - Int. User Meeting 2003, AVL, 14-15 October 2003, Graz, Austria

118. **Ong, S.-C.** The Development and Application of a Diesel Ignition and Combustion Model for Multidimensional Engine Simulations [Text] / S.C. Han Zhiyu, R.D. Reitz // Society of Automotive Engineers, New York, Ny, EtatsUnis, 1995,-Vol. 104.-№3.-P. 502-518

119. Performance simulation and gas dynamics. WAVE. Product description. Ricardo Software: 2004.

120. **Reitz. R.D.** Development and testing of diesel engine CFD models [Text] / R.D. Reitz, C.J. Rutland // Progress in Energy and Combustion Science – Vol. 21, Issue 2, 1995, P. 173–196

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Расчет СВЧ нагрева топлива, изменения температуры топлива и характеристик впрыскивания и распыливания топлива

### Расчет нагреваемой порции топлива

Расчет ведется для дизелей семейства КамАЗ – 740 (форсунка типа 33).

Определим время пуска: 5 попыток по 20 с - 1 минута. В соответствии с требованиями ГОСТ [29] выбираем интервал в 1,5 минуты.

За 1,5 минуты при частоте вращения коленчатого вала  $200 \text{ мин}^{-1}$  и максимальной цикловой подаче  $220 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  будет впрыснуто форсунками  $0,264 \text{ л}$  топлива.

С учетом [29], предварительно проведенный эксперимент позволил подобрать наиболее оптимальную форму камеры  $0,07 \times 0,07 \times 0,08 \text{ м}$ , общим объемом  $0,392 \text{ л}$

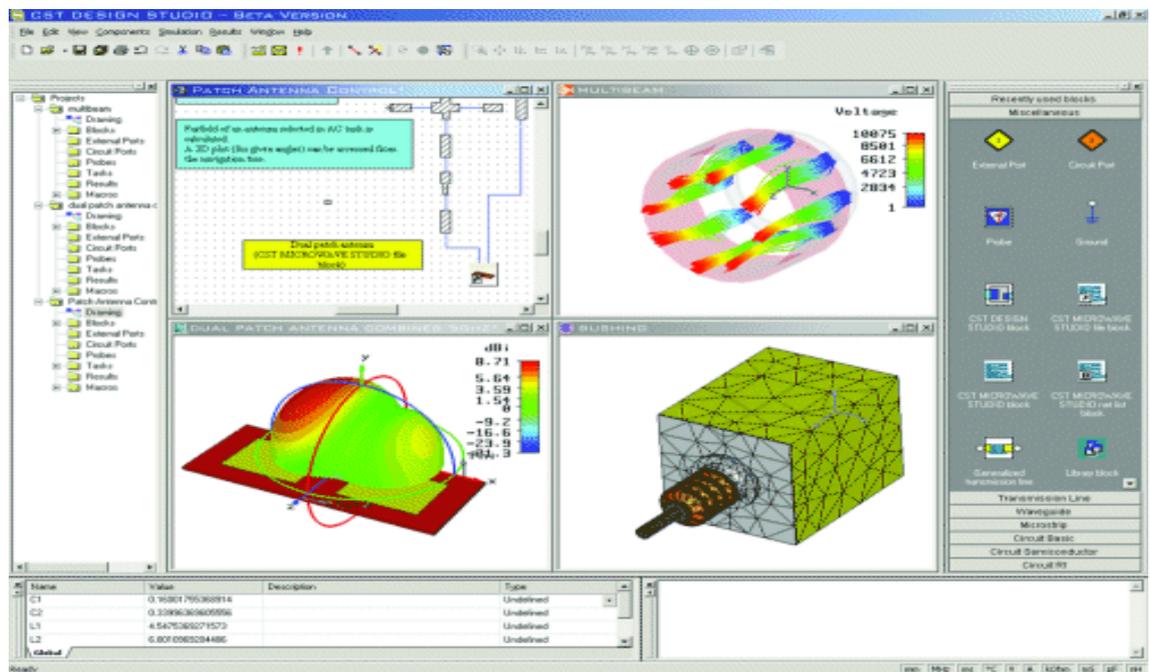


Рисунок А.1 – Окно программы расчета СВЧ нагрева QuickWave-3D

Начальные условия математической модели:

$V=0,00392 \text{ м}^3$  – объем камеры нагрева;

$\varepsilon = 2,0$ - диэлектрическая проницаемость топлива;

$tg \sigma = 0,2$  – тангенс угла диэлектрических потерь топлива;

$f = 2,4$  МГц - частота электромагнитного поля;

$T_0 = 233, 243, 253$  К – начальная температура топлива

$E = 90 \frac{В}{м}$  – модуль напряженности электромагнитного поля.

$a = 0,07$  м  $b = 0,08$  м - линейные размеры резонатора

$\alpha = 0,5$  Дб/м- коэффициент затухания электромагнитной волны в материале, заполняющем волновод

$a^2 = 0,02$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> – квадрат коэффициента температуропроводности

Результаты расчета в среде MathCad и QuickWave-3D

Таблица А.1 – Расчетные изотермы в поперечном сечении волновода

Сечение, м	Температура, К в продольном сечении, м		
	0,02	0,04	0,06
0,01	47	51	48
0,02	49	52	50
0,03	52	53	52
0,04	52	54	53
0,05	51	52	50
0,06	50	51	49
0,07	47	50	47
(время нагрева 1 минута, мощность источника излучения 1,5 кВт)			

### Расчет изменения температуры топлива в результате конвективных теплопотерь и сжатия

Система топливоподачи разбивалась на 3 участка; от устройства СВЧ нагрева до топливоподкачивающего насоса, от топливоподкачивающего насоса до ТНВД, от ТНВД до форсунки.

$T_{вх} = 51$ -температура топлива на входе в насос, К;

$T_{вых} = 56$  – температура топлива на выходе из насоса, К;

$V = 0,001$  - удельный объем топлива, м<sup>3</sup>;

$C_p = 2080$  - удельная теплоемкость топлива Дж/кг·К;

$P_{вх} = 10$  - давление на входе в насос, Па;

$P_{вых} = 20$  - давление на выходе из насоса, Па;

$\eta = 0,44$  - коэффициент полезного действия насоса;

$D_i = 0,2$  - коэффициент Джоуля – Томсона, К/Па;

$k_1 = 1,1$  - коэффициент аппроксимации;

$k_2 = 1,23$  – коэффициент аппроксимации.

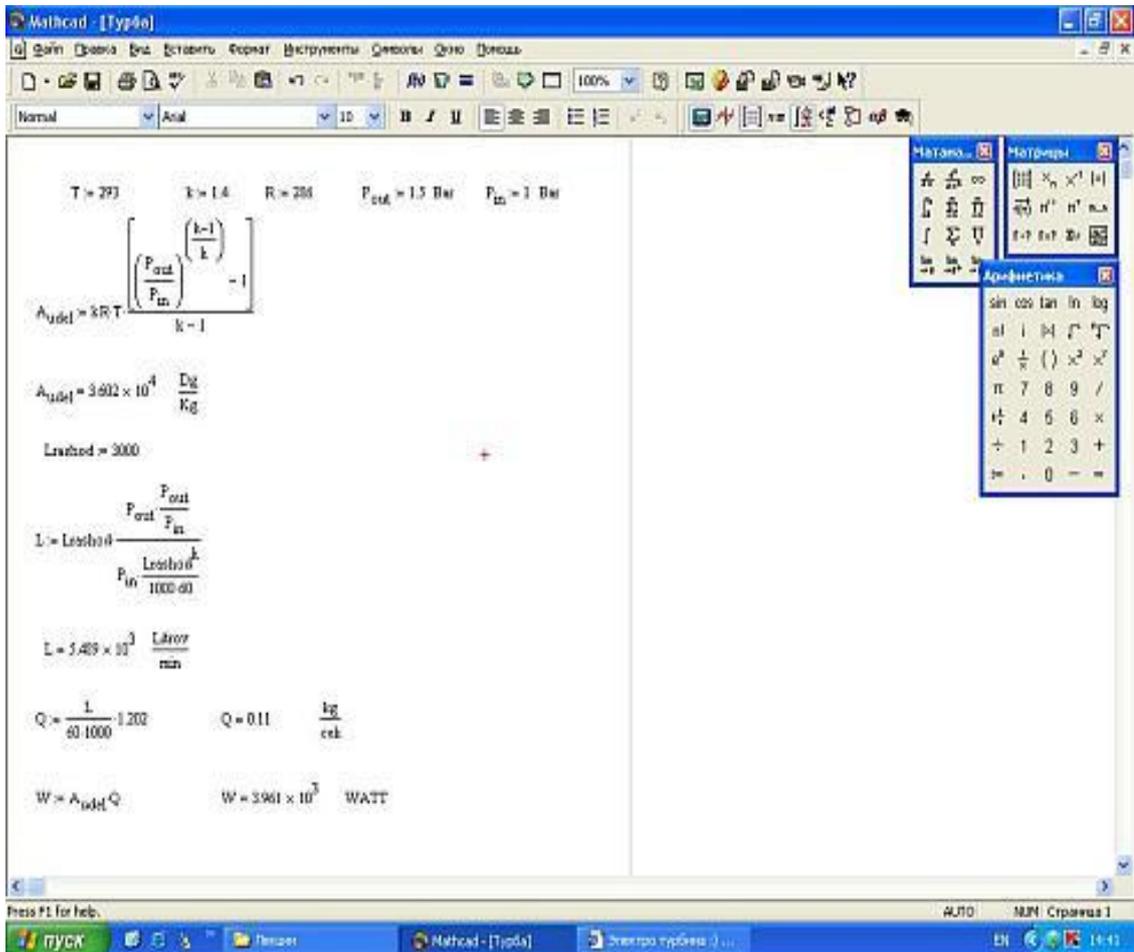


Рисунок А.2 – Окно программы расчета изменения температуры топлива при его продвижении в системе топливоподдачи MathCad

### Расчет среднего диаметра капель топлива

Mathcad - [SPC\_ControlCharts]

Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

100%

Arial 10 B I U

$x = \int \alpha \beta$

Go

$k := 2 \cdot rd + 2$  sample size

$$c_4(k) := \sqrt{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k-1}{2}\right)}$$

$$= \frac{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_4}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_5}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_6}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_7}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_8}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_9}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{10}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{11}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{12}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{13}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{14}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \cdot \frac{\mu_{15}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3}$$

$A_1 := \text{Coeff}^{(1)}$   $A_2 := \text{Coeff}^{(2)}$   $A_3 := \text{Coeff}^{(3)}$

$B_3 := \text{Coeff}^{(5)}$   $B_4 := \text{Coeff}^{(6)}$   $B_5 := \text{Coeff}^{(7)}$

$d_2 := \text{Coeff}^{(4)}$   $d_3 := \text{Coeff}^{(8)}$   $D_3 := \text{Coeff}^{(9)}$

$$A_{2,k} := \frac{3}{d_{k-2}^2 \sqrt{k}}$$

$$D_{3,k} := 1 - \frac{3 \cdot d_{k-2}^3}{d_{k-2}^2}$$

$D_{3,k} := \text{if}(D_{3,k} > 0, \dots)$

	0
0	1.128
1	1.693
2	2.059
3	2.326
4	2.534
5	2.704
6	2.847
7	2.97
8	3.078
9	3.173
10	3.258
11	3.336
12	3.407
13	3.472
14	3.532
15	...

	0
0	1.88
1	1.023
2	0.729
3	0.577
4	0.483
5	0.419
6	0.373
7	0.337
8	0.308
9	0.285
10	0.266
11	0.249
12	0.235
13	0.223
14	0.212
15	...

	0
0	0
1	0
2	1.881
3	1.023
4	0.729
5	0.577
6	0.483
7	0.419
8	0.373
9	0.337
10	0.308
11	0.285
12	0.266
13	0.249
14	0.235
15	...

for help. AUTO NUM Pages 10. NET

Рисунок А.3 – Окно программы для расчета среднего диаметра капель

Расчет среднего диаметра капель велся по формулам Главы 2 в среде MathCad и Excel, значения представлены на рисунке А.3.

На рисунке Б.1 представлен укрупненный алгоритм расчета СВЧ нагрева дизельного топлива и характеристик впрыскивания и распыливания топлива форсункой

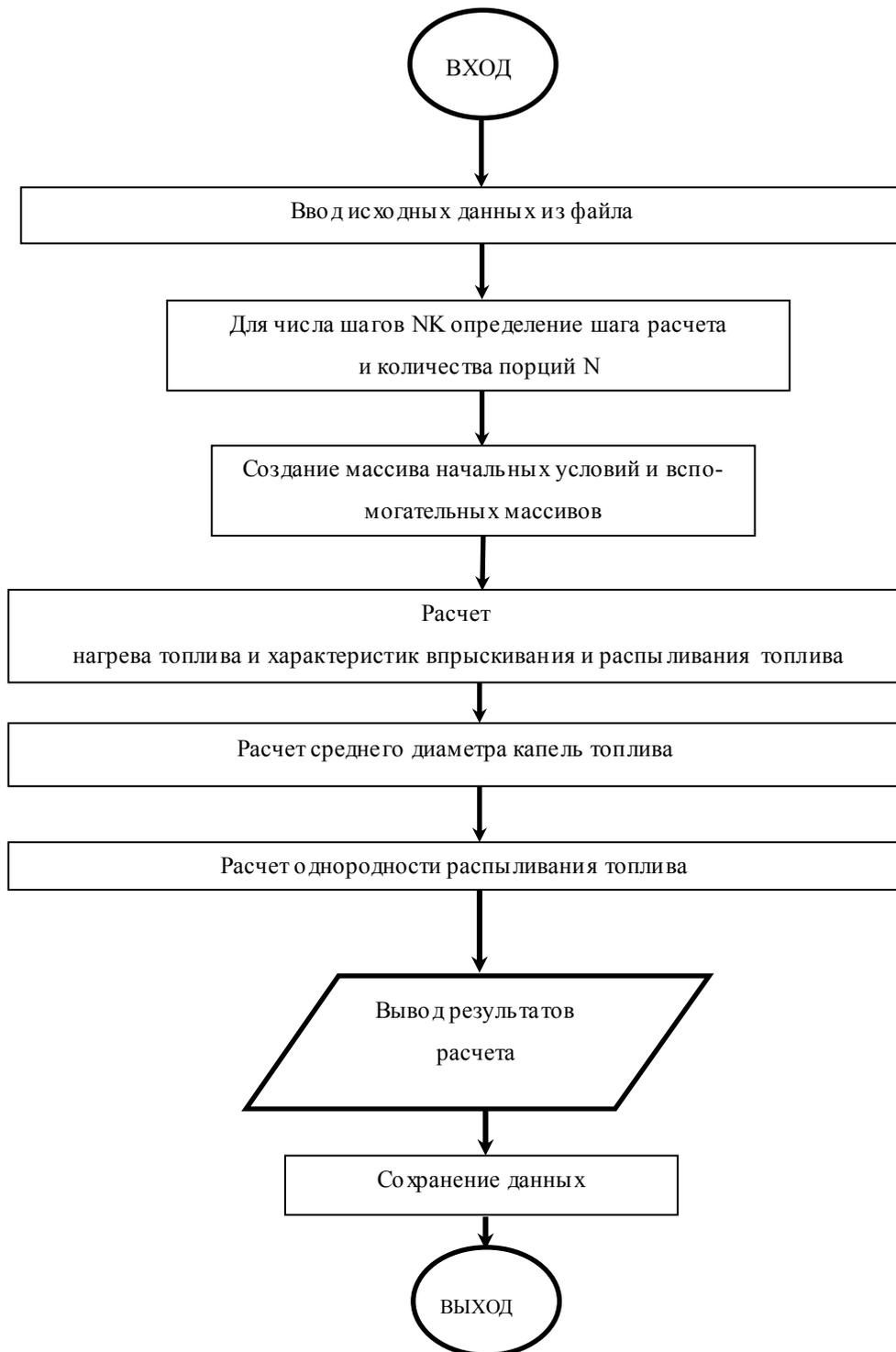


Рисунок Б.1 – Укрупненный алгоритм расчета СВЧ нагрева топлива и характеристик впрыскивания и распыливания

Приложение В

Примеры килограммы и фотографий распыливания топлива форсункой

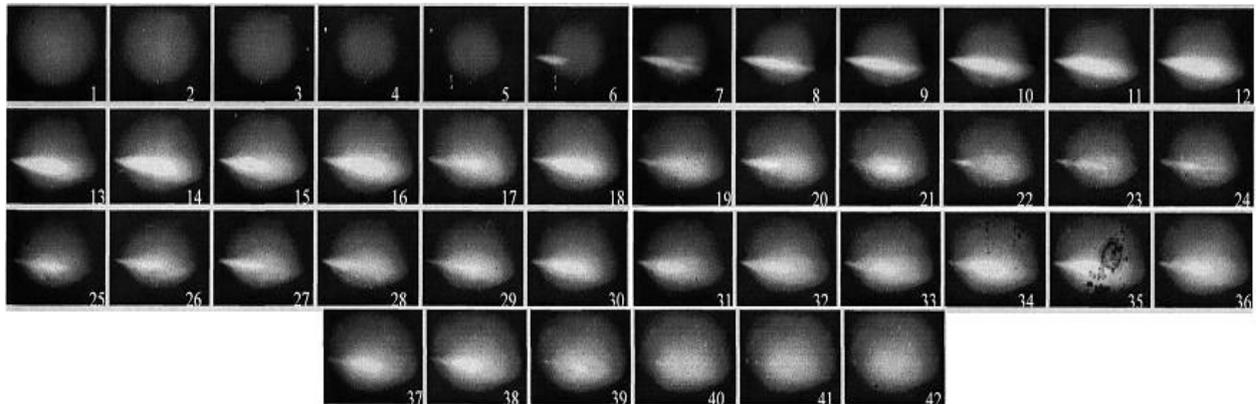


Рисунок Г.1 - Кинограмма распыливания топлива форсункой: частота вращения вала ТНВД  $n = 100$  об/мин; температура минус  $35^{\circ}\text{C}$ ; скорость съемки - 2000 кадров в сек.

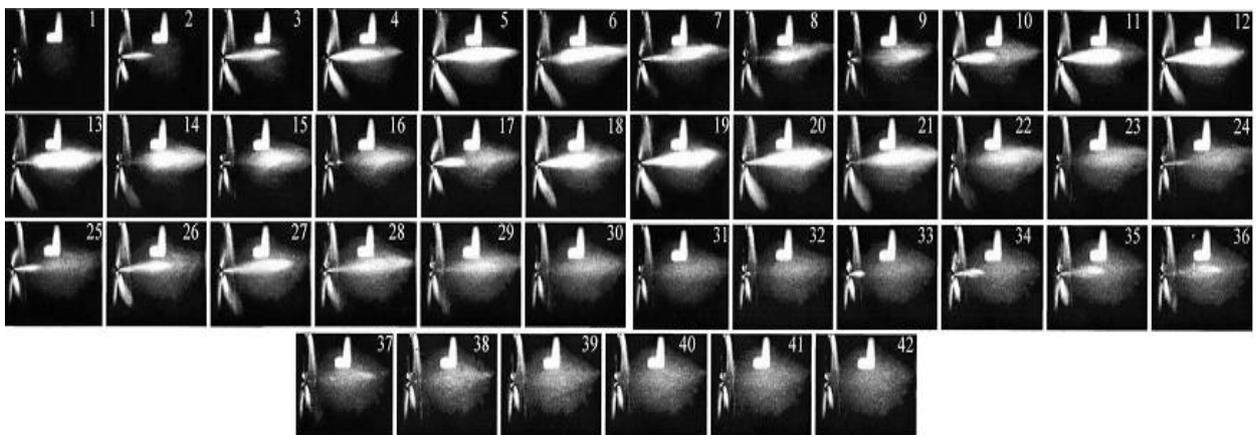


Рисунок Г.2 - Кинограмма распыливания топлива форсункой: частота вращения вала ТНВД  $n = 100$  об/мин; температура  $10^{\circ}\text{C}$ ; скорость съемки - 2000 кадров в сек.

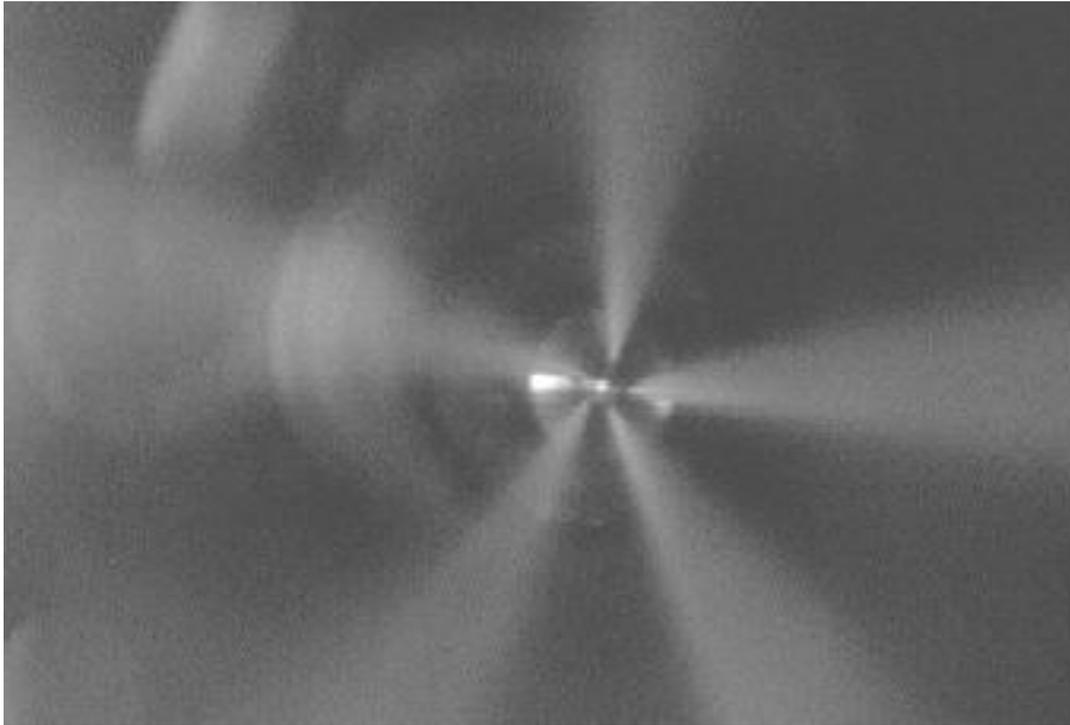
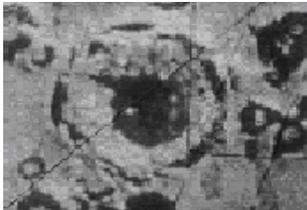


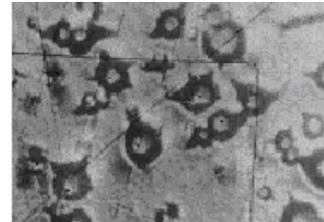
Рисунок Г.3 - Кадр распыливания топлива форсункой: время экспозиции 39 мкс



а)



б)



в)

Рисунок Г.4 - Фотография улавливания частиц на закопченную сажей пластину.

- а) температура топлива минус 35°С диаметр частиц от 100 до 140 мкм;
- б) температура топлива минус 10°С диаметр частиц от 80 до 100 мкм;
- в) температура топлива 10°С диаметр частиц до 60мкм.