

ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 621.43



ПАВЛОВ Денис Викторович

УЛУЧШЕНИЕ ПУСКОВЫХ КАЧЕСТВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ С
ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕ-
РАТУР ДО МИНУС 60 °С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ И ПОДОГРЕВОМ
ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА

05.04.02-Тепловые двигатели

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Хмелев Р.Н.

Тула, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	5
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПУСКА ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	14
1.1 Предварительные замечания.....	14
1.2 Особенности пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды.....	15
1.3 Анализ методов и средств облегчения пуска ПДВС.....	19
1.3.1 Свечи накаливания.....	19
1.3.2 Легковоспламеняющиеся жидкости (пусковые жидкости).....	21
1.3.3 Электрофакельный подогрев.....	23
1.3.4 Автономные подогреватели охлаждающей жидкости и воздушные отопители.....	24
1.3.5 Нагреватели с источником питания 220В.....	26
1.4 Анализ научных трудов посвященных вопросам облегчения пуска дизельных двигателей.....	29
1.5 Обзор запатентованных технических решений подогрева впускного воздуха в ПДВС.....	35
1.6 Выводы по первой главе. Постановка цели и задач исследования.....	40
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРЕДПУСКОВОЙ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	44
2.1. Предварительные замечания.....	44
2.2. Обзор объекта исследования.....	44
2.3 Анализ пуска дизеля при отрицательных температурах окружающей среды.....	45

2.4 Анализ методики пуска дизеля.....	46
2.5 Штатные средства облегчения пуска дизеля.....	49
2.6 Экспериментальные исследование процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля с применением штатных систем облегчения пуска.....	51
2.6.1. Оценка эффективности работы штатного подогревателя масла в картере дизеля и определение закономерности прогрева.....	52
2.6.2 Определение изменения температуры в камере сгорания на стадии предпусковой подготовки и пуска дизеля. Определение средней пусковой частоты	54
2.7 Выводы по второй главе.....	61
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА И РАБОТЫ МАЛОРАЗМЕРНОГО ДИЗЕЛЯ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	62
3.1. Предварительные замечания.....	62
3.2 Разработка классификации математических моделей систем облегчения пуска и работы ПДВС.....	62
3.3. Анализ математических моделей процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля.....	69
3.4 Разработка математической модели предпусковой подготовки, пуска и функционирования дизеля.....	77
3.5 Закономерности влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на пусковые характеристики дизеля при температуре минус 60 °С.....	88
3.6 Математическое моделирование процесса пуска дизеля с выходом на режим холостого хода.....	91
3.7 Выводы по третьей главе.....	93
ГЛАВА 4. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПУСКА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СПОСОБА В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	95
4.1. Предварительные замечания.....	95

4.2. Исследования закономерностей влияния степени и способа подогрева впускного воздуха на температуру в камере сгорания.....	96
4.3. Исследования закономерностей пуска дизеля способом принудительной подачи в цилиндр дизеля предварительно разогретого воздушного заряд.....	101
4.4 Разработка и апробация устройства подогревателя впускного воздуха (ПВВ)	105
4.4.1 Устройство и принцип действия ПВВ.....	105
4.4.2 Сравнительный анализ пусков (работы) дизеля в условиях арктических температур окружающей среды.....	111
4.5 Разработка рекомендаций для пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С.....	118
4.6 Выводы по четвертой главе.....	119
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	137

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АКБ – аккумуляторная батарея;
- ВМТ – верхняя мертвая точка
- ГРМ – газораспределительный механизм;
- ДТ – дизельное топливо;
- КД – конструкторская документация;
- КШМ – кривошипно-шатунный механизм;
- ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость;
- НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;
- НИР – научно-исследовательская работа;
- ОГ – отработавшие газы;
- ПДВС – поршневой двигатель внутреннего сгорания;
- ПВВ – подогреватель впускного воздуха;
- ПЖД – подогреватель жидкостный дизельный;
- ПМ – программа-методика;
- СВЧ – сверхвысокочастотный;
- ТНВД – топливный насос высокого давления;
- ТУ – технические условия;
- ТЭН – трубчатый электронагреватель;
- ЦПГ – цилиндропоршневая группа;
- ЭФП – электро-факельный подогрев;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- c_m – средняя скорость поршня;
 f_{cm} – площадь поверхности теплообмена;
 f_n – площадь поршня;
 G_n – секундный массовый приход рабочего тела;
 G_p – секундный массовый расход рабочего тела;
 G_T – часовой расход топлива (пусковой);
 i_H – степень износа поршневых колец;
 i – удельная энтальпия рабочего тела;
 J – момент инерции;
 M_c – момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала;
 M_∂ – движущий момент;
 M_n – пусковой момент;
 m_1, m_2 – показатели характера сгорания;
 n_{CP} – средняя частота вращения коленчатого вала;
 n_P – мгновенная частота вращения коленчатого вала расчетная;
 $n_{CP,P}$ – средняя частота вращения коленчатого вала расчетная;
 ΔP – давление топливовоздушной смеси;
 p_P – давление в цилиндре расчетное;
 p – давление рабочего тела в цилиндре;
 p_0 – давление рабочего тела под поршнем
 \dot{Q} – секундный приход (расход) энергии в форме теплоты;
 \dot{Q}_e – секундный приход энергии в форме теплоты при включении свечи накаливания;
 \dot{Q}_g – секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси;
 \dot{Q}_t – секундный расход энергии в форме теплоты в результате теплообмена в цилиндре;
 \dot{Q}_n – теплообмен через стенку;

- r_{H_2O} – коэффициент концентрации H_2O в топливовоздушной смеси;
- r_{CO_2} – коэффициент концентрации CO_2 в топливовоздушной смеси;
- $t_{см}$ – температура топливовоздушной смеси;
- $t_{ср}$ – средняя температура в цилиндре экспериментальная;
- $t_{ср,р}$ – средняя температура в цилиндре расчетная;
- t_p – температура в цилиндре расчетная;
- t_{oc} – температура окружающей среды;
- $t_{вп}$ – температура впускного воздуха;
- $T_{см}$ – температура стенки цилиндра;
- T_0 – температура наружной стенки;
- u – удельная внутренняя энергия рабочего тела;
- V_h – рабочий объем двигателя;
- W – текущий объем рабочего тела в цилиндре;
- W_k – текущий объем рабочего тела в картере
- α – коэффициент избытка воздуха;
- α_m – коэффициент конвективного теплообмена;
- τ – время;
- φ – угол поворота коленчатого вала;
- $\varphi_{кг}$ – угол начала сгорания;
- $\varphi_{нв}$ – угол начала впрыскивания;
- φ_z – продолжительность сгорания;
- ω – угловая скорость вращения коленчатого вала;
- μf – эквивалентная площадь утечек в ЦПГ;

ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритные универсальные одноцилиндровые четырехтактные дизельные двигатели мощностью до 15 кВт широко применяются для привода электроагрегатов, компрессоров, коммунальной и строительной техники, минитракторов, водного транспорта, автономных агрегатов с круглосуточным режимом эксплуатации в условиях низких и высоких температур окружающей среды или работающих в замкнутом объеме, для различных транспортных средств малой грузоподъемности.

К производителям данных двигателей относятся: «Hatz diesel» (Германия), «Lombardini Kohler kompani» (Италия), «Robin-Subaru» (Япония), «DMB-Fabrica Malolitraznih motora» (Сербия), китайские производители, АО «АК «Туламашзавод» (Россия).

Необходимость создания и использования отечественных двигателей обусловлена политикой импортозамещения, закрепленной в следующих нормативно-правовых документах:

– приказ Минпромторга России от 31.03.2015 № 648 «Об утверждении отраслевого плана мероприятий по импортозамещению в автомобильной промышленности Российской Федерации».

– распоряжение Правительства РФ от 29.12.2015 № 2744– р.

– распоряжение Правительства РФ от 31.12.2015 № 2781– р.

– постановление Правительства РФ от 29.12.2015 №1485 [54].

– постановление Правительства РФ от 30 апреля 2020 г. N 616 «Об установлении запрета на допуск промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, для целей осуществления закупок для государственных и муниципальных нужд, а также промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, работ (услуг), выполняемых (оказываемых) иностранными лицами, для целей осуществления закупок для нужд обороны страны и безопасности государства»[84].

В современных условиях одним из важнейших направлений, как развития экономики страны, так и повышения обороноспособности является освоение Арктической зоны. Государственная программа развития Арктики утверждена Постановлением Правительства РФ от 21.04.2014 г. № 366 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года».

Таким образом, для создания необходимых условий хозяйственной деятельности в Арктике с учетом отраслевых планов импортозамещения, актуальным является применение отечественных малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением в составе силовых агрегатов:

- дизель-генераторных установок;
- буровых установок;
- мотоблоков/мини-тракторов;
- сварочных агрегатов;
- мотопомп.

В тоже время для условий Арктики с температурами окружающей среды в зимний период до минус 60 °С серьезной проблемой является обеспечение надежного, гарантированного пуска и работоспособности малогабаритного дизеля с воздушным охлаждением. С учетом специфики применения изделий на базе малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением, зачастую связанной с жесткими условиями эксплуатации в достаточно отдаленной от инфраструктуры местности, важной особенностью дизеля будет являться способность его автономного пуска без применения стационарных, а так же технически сложных систем требующих постоянного наличия мощного источника тепловой либо электроэнергии.

Дизели, в конструкции которых реализована возможность такого пуска в настоящее время отсутствуют. Решению рассматриваемой проблемы посвящена данная работа.

Для систематизированного подхода к решению данной проблемы следует придерживаться предложенной классификации диапазона отрицательных температур окружающей среды представленной в таблице 1.

Диапазоны отрицательных температур воздуха окружающей среды

№	Название диапазона	t, °С
1	Низкие температуры	от 0 до минус 25
2	Сверхнизкие температуры	от минус 25 до минус 45
3	Арктические	от минус 45 и ниже

В соответствии с изложенным, **целью диссертации** является улучшение пусковых качеств малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур до минус 60 °С.

Цель была реализована в результате постановки и решения следующих **задач**:

- провести анализ проблемы пуска дизельного двигателя в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- провести анализ систем предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- разработать математическую модель процессов предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением во всем диапазоне отрицательных температур окружающей среды;
- установить закономерности влияния температуры воздуха на впуске, эквивалентной площади утечек в цилиндропоршневой группе (ЦПГ), средней пусковой частоты на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания дизеля;
- провести экспериментальные исследования процессов предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды.
- разработать конструкцию (способ) предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур (до минус 60 °С).

Объектом исследования в данной работе является многоцелевой быстроходный дизель с воздушным охлаждением типа 1Ч9,5/8,0.

Предметом исследования процесс предпусковой подготовки и пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Научная новизна работы заключается в:

– в разработке математической модели, обеспечивающей комплексное имитационное моделирование пускового режима и работы дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды;

– в установлении закономерностей устойчивого процесса пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур до минус 60 °С;

– в установлении закономерностей влияния конструктивных и эксплуатационных параметров дизеля на эффективность процесса пуска;

Практическая значимость результатов заключается:

– в разработке практических рекомендаций пуска малоразмерных дизелей в условиях арктических температур, отработке их конструкции, а также в повышении экономического и оборонного потенциала страны при освоении Арктической зоны, за счет применения отечественных энергетических установок мощностью до 15 кВт, адаптированных для работы в условиях арктических, до минус 60 °С, температур окружающей среды;

– в разработке программного обеспечения моделирования процесса пуска дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур окружающей среды;

– в разработке способа пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических, до минус 60 °С, температур окружающей среды, а так же действующего макетного образца устройства для его реализации пуска.

Методология и методы исследования. В основе исследований лежат расчетно – экспериментальные методы, базирующиеся на теории рабочих процессов поршневого двигателя внутреннего сгорания (ПДВС), тепломеханике, статистиче-

ском анализе и вычислительной математике, а также известных и апробированных на практике экспериментальных методах исследования ПДВС.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель пуска и работы дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- закономерности влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на эффективность пуска дизеля типа 1Ч9,5/8,0;
- техническое решение по осуществлению пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды до минус 60 °С.

Достоверность результатов исследования базируется на:

- использовании фундаментальных уравнений тепломеханики (термодинамики открытых систем), а так же современных численных методов реализации соответствующих математических моделей;
- удовлетворительном совпадении результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на базе АО «АК «Туламашзавод», при проведении исследований на натурном объекте.
- использовании современного высокотехнологичного оборудования при проведении экспериментов с натурным объектом;

Личный вклад автора в разработку положений и получение результатов исследования состоит в:

- выполнении анализа научных трудов посвященных вопросам облегчения пуска поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), запатентованных технических решений подогрева впускного воздуха в ПДВС, анализа методов и средств облегчения пуска ПДВС;
- разработке математической модели, пуска и работы дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- разработке, организации и проведении экспериментов по исследованию предпусковых и пусковых качеств дизеля со штатными системами облегчения пуска и с устройством подогрева впускного воздуха в условиях отрицательных температур окружающей среды;

- разработке технических решений и практических рекомендаций пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды до минус 60 °С.

Реализация работы. Результаты диссертации внедрены в практику конструкторского отдела двигателей АО «АК «Туламашзавод», а также в учебный процесс кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Апробация работы. Результаты исследований доложены и обсуждены на:

– научно–практической конференции по направлениям «Альтернативные источники энергии в транспортно–технологическом комплексе: Проблемы и перспективы рационального использования» г. Воронеж, 2018 г.

– Международной очно–заочной научно–технической конференции «Проблем исследования систем автомобильного транспорта» г. Тула, 2016 г.;

– 3-ей Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России» г. Курск, 2018г.;

– Международной научно–технической конференции "Пром – Инжиниринг" 2020;

– Международной научно–технической конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021) г. Севастополь, 2021;

– 11-ой Всероссийской научно–технической конференции международным участием «Современные инновации в науке и технике» г. Курск, 2018г.

Публикации. В ходе выполнения диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, из которых 3 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК, 2 статьи опубликованы в изданиях индексируемых в базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы и приложения. Содержит 161 страницу машинописного текста, включающего 42 рисунка, 10 таблиц, 16 приложений.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПУСКА ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1 Предварительные замечания

ПДВС представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных механизмов и систем, в которых имеют место процессы различной природы: механические, тепловые, газодинамические, гидродинамические, физико-химические и информационные [65].

В условиях отрицательных температур работу ПДВС условно можно разделить на 3 этапа:

1. Этап предпусковой подготовки;
2. Непосредственно пуск ПДВС;
3. Прогрев и работа двигателя (принятие нагрузки).

Для каждого из этих этапов характерны процессы и факторы требующие к себе более пристального внимания, изучения и управления для наиболее эффективной работы ПДВС. На этапе непосредственного пуска ПДВС основными факторами, влияющими на эффективность процесса, являются:

- температура свежего воздушного заряда;
- сопротивление проворачиваемости коленчатого вала;
- скорость проворачивания;
- температура дизельного топлива;

Пусковые качества дизелей оценивают по минимальной температуре надежного пуска, времени подготовки двигателя к принятию нагрузки, минимальной пусковой частоте и условной величине – средним давлением трения (отношение силы трения к площади поршня) [22].

Единственным нормативным документом, на сегодняшний день, определяющим требования к пусковым качествам двигателей является ГОСТ Р 54120 – 2010 «Пусковые качества» [75]. В соответствии с ним пуск двигателя, оборудованного всеми навесными агрегатами, на основном топливе не более чем за три

попытки пуска «холодного двигателя» и не более чем за две попытки пуска «горячего двигателя» и двигателя после тепловой подготовки называют надежным.

Под пуском следует понимать неустановившейся режим работы двигателя, характеризуемый процессом раскрутки его вала от неподвижного состояния до пусковой частоты вращения и начала работы двигателя на топливе, осуществляемый путем управления исполнительными органами и отработкой операций, предусмотренных алгоритмом управления. Время пуска, минимальная температура пуска, продолжительность пуска — термины, определяющие пусковые качества двигателя [23].

Учитывая сложность климатических условий эксплуатации данной работы, целесообразно рассматривать два вида пуска:

- надежный пуск;
- гарантированный пуск, понятие которого будет раскрыто в последующих главах.

Первая глава посвящена изучению особенности пуска. Проанализированы методы и средства облегчения пуска ПДВС. Более детально рассмотрены принцип действия и конструкции наиболее часто применяемых устройств облегчения пуска ПДВС в условиях отрицательных температур окружающей среды. Так же рассмотрены научные труды, посвященные вопросам облегчения пуска дизелей при отрицательных температурах окружающей среды, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

1.2 Особенности пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды

При отрицательной температуре окружающей среды динамика пуска дизеля усложняется. Пуск холодного дизеля представляет трудности по следующим причинам:

- низкая температура воздушного заряда;

- повышенное сопротивление проворачиванию коленчатого вала и перемещению других, кинематически с ним связанных деталей (поршни, детали механизма газораспределения; и т.д.), из – за увеличенной вязкости масла;
- ухудшение условий распыливания топлива;
- усиленная теплоотдача в стенки цилиндра;
- потеря части воздушного заряда.

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 частоте вращения коленчатого вала $n_{\text{ср}} 100 \text{ мин}^{-1}$, при температуре окружающего воздуха минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и холодных стенках цилиндра в дизелях температура конца сжатия составляет всего плюс $137 \text{ }^\circ\text{C}$ – плюс $177 \text{ }^\circ\text{C}$. Снижение скорости движения поршня и увеличенные зазоры в цилиндропоршневой группе ведут к потерям воздушного заряда, перетекающего через зазоры в картер, что приводит к снижению давления воздуха в конце такта сжатия и соответствующему снижению температуры. На пусковых режимах скорость потока воздуха на впуске мала, и запаздывание закрытия впускного клапана после нижней мертвой точки приводит к обратному выбросу части воздушного заряда и потере части хода поршня. Давление воздуха в конце такта сжатия при пуске холодного двигателя может составлять до 75 % номинальной величины. Низкая температура окружающего воздуха отрицательно сказывается и на качестве распыливания топлива форсунками, что также затрудняет пуск дизеля. 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 запор-

ной частью иглы распылителя 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. Следствием некачественного распыливания является так же неполное сгорание топлива, образование лаковых отложений.

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 [17, 108]. При более низких температурах необходимо применять средства и способы облегчения пуска дизеля [50, 68, 110]. Динамика процесса пуска двигателей внутреннего сгорания детально рассмотрена в работе [53].

Также следует отметить, что в период пуска и предпускового прогрева работа ДВС сопровождается интенсивным изнашиванием по причине масляного голодания и сухого трения в зоне контакта поверхностей трения деталей.

При низких температурах в режиме пуска распределение сил трения резко изменяется. Так, при понижении температуры деталей до минус 30 °С абсолютная суммарная величина сил трения возрастает в 3-4 раза по сравнению с запуском при нормальных условиях [46]. При этом пуск ПДВС без должной подготовки имеет существенные последствия, это проворачивание вкладышей коленчатого вала, выход из строя стартера, пусковые износы.

В общем случае классификация причин затрудненного «холодного» пуска дизелей и методов повышения его эффективности, предложена в работе [66] автора Харитонов В.В. (рисунок 1.1).

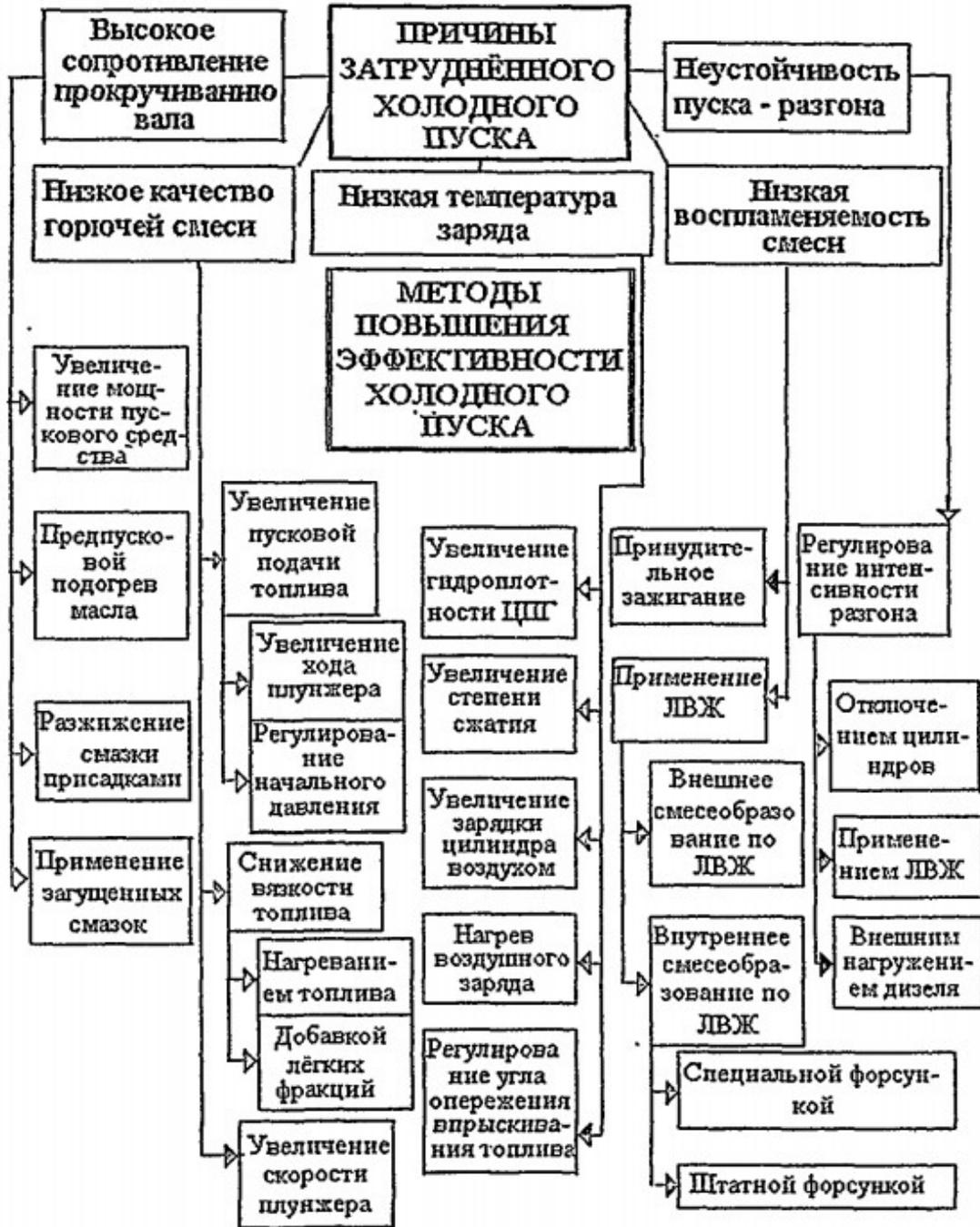


Рисунок 1.1 – Причины затрудненного холодного пуска дизеля и методы повышения эффективности холодного пуска [66]

1.3 Анализ методов и средств облегчения пуска ПДВС

1.3.1 Свечи накаливания

На сегодняшний день в стандартную комплектацию дизеля входят свечи накаливания открытого и закрытого типа для подогрева камеры сгорания (рисунок 1.2), а так же свечи подогрева воздуха во впускном трубопроводе (рисунок 1.3). Свечи накаливания открытого типа устанавливаются таким образом, чтобы струя топлива находилась на некотором расстоянии от нее, с целью сохранения ресурса свечи. Если струя топлива попадает на свечу, то срок службы ее резко уменьшается. Спираль свечей закрытого типа или штифтовых защищена кожухом из железоникель-хромового сплава «инконель», имеющего высокую тепловую и коррозионную стойкость в среде горячих газов. Кожух заполнен материалом с высокой теплопроводностью. Такие свечи в камере сгорания устанавливают непосредственно под топливную струю.

Чаще используют однополюсные штифтовые свечи, потребляющие токи силой 5 А и 10 А при напряжениях соответственно 24 В и 12 В. Ток потребления двухполюсных свечей составляет до 50 А при напряжении 1,7 В. Время прогрева составляет 1-2 мин. Как положительную составляющую следует отметить достаточно большую тепловую инерцию таких свечей.

Эффективность применения свечей накаливания при пуске дизелей зависит от рабочей температуры открытой спирали или кожуха штифтовой свечи, которая определяется силой проходящего по спирали тока.

Часто применяемыми представителями свечей подогрева воздуха на впуске являются свечи СН 150 (рисунок 1.3 а) мощностью 400Вт и потреблением тока силой 45А – 47А. Рабочая температура свечи 900°С – 950°С через 40 – 60 с момента подключения к аккумуляторной батарее.

Лучший теплоотвод от нагревательного элемента обеспечивается при его фланцевом расположении (рисунок 1.3 б).

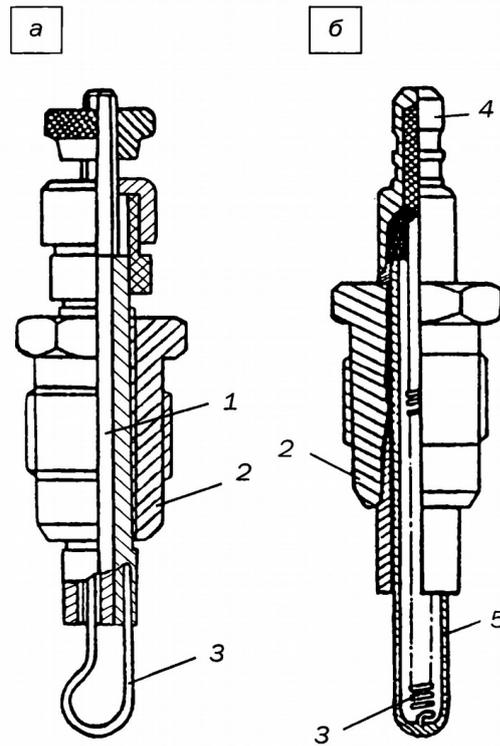


Рисунок 1.2 – Свеча накаливания для подогрева камеры сгорания: а) – с открытым нагревательным элементом; б) – штифтовая: 1 – центральный электрод; 2 – корпус; 3 – спираль; 4 – вывод; 5 – кожух спирали

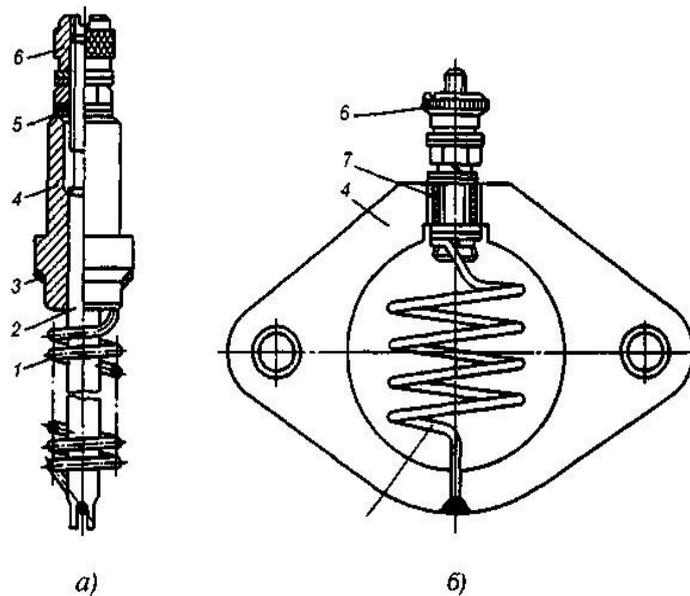


Рисунок 1.3 – Свеча подогрева воздуха на впуске: а) – СН 150; б) – фланцевая свеча: 1 – спираль накаливания; 2 – стержень; 3 – уплотнительная шайба; 4 – корпус; 5 – изоляционная шайба; 6 – контактная гайка; 7 – изоляционная втулка

Применение свечи СН-150 обеспечивает увеличение температуры в цилиндре в конце такта сжатия на 20-35°C, в результате чего минимальная температура пуска двигателя становится на 5-10°C ниже. При установке таких свечей необходимо учитывать конструкцию трубопровода из-за больших тепловых потерь [3]. Свечами подобного класса оснащены двигатели ЯМЗ 650.10 (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4– Впускной трубопровод двигателя ЯМЗ 650.10

1.3.2 Легковоспламеняющиеся жидкости (пусковые жидкости)

На сегодняшний день практически нормой стало применение легковоспламеняющихся жидкостей как отечественного так и зарубежного производства. Среди отечественных наиболее известны пусковые жидкости «Арктика» и «Холод Д-40». Процентное содержание химического состава жидкостей представлено в Таблице 2. Температура воспламенения диэтилированного эфира составляет 180-205°C.

Жидкость обычно распыляют из аэрозольных баллончиков или аэрозольным устройством с электромагнитным приводом (рисунок 1.5) небольшими порциями во впускной воздушный трубопровод, либо подают непосредственно в камеру сгорания совместно с топливом.

Жидкость для облегчения пуска в аэрозольном устройстве находится под давлением. Работа устройства основана на принципе вытеснения. В качестве вытесняющего газа применяют пропан или любой другой являющейся топливом, у которого зависимость давления от температуры минимальная.

Состав пусковых жидкостей

Легковоспламеняющаяся Жидкость	Деэтилированный эфир, %	Газовый бензин %	Изопропиленат %	Присадки %	Продукты окисления %	Масло %
Арктика	45-60	35-55	1-1,5	2	10	-
Холод Д-40	58-62		13-17			8-12 для судовых турбин

При использовании легковоспламеняющихся жидкостей запуск дизелей снижается до температуры окружающего воздуха минус 30°C [3].

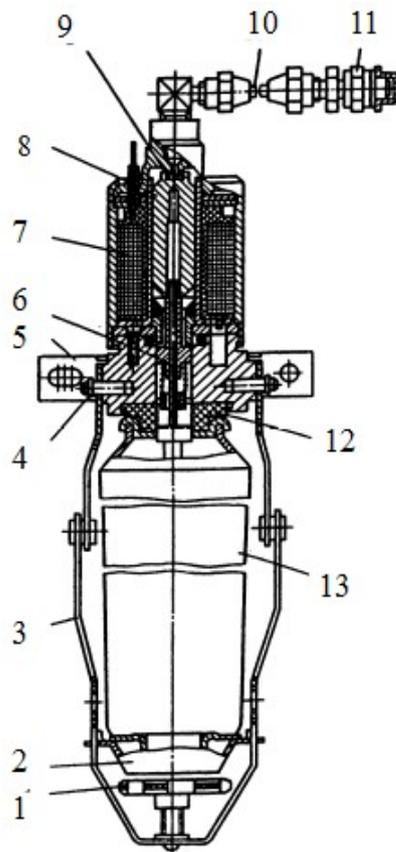


Рисунок 1.5– Аэрозольное устройство с электромагнитным приводом:

1– регулировочный винт; 2– нажимной подпятник; 3– складывающиеся дужки; 4– ось дужек; 5– кронштейн крепления; 6– эмульсионная трубка; 7– электромагнит; 8– сердечник; 9– пластинчатый клапан; 10– трубопровод; 11– форсунка; 12– резиновый уплотнитель; 13– аэрозольный баллон.

1.3.3 Электрофакельный подогрев

Еще одной известной и широко применяемой системой облегчения пуска двигателя при отрицательных температурах окружающего воздуха является электрофакельный подогрев (ЭФП) (рисунок 1.6) воздуха на впуске.

При использовании такой системы, подогрев воздуха во впускном канале осуществляется за счет факела образующегося в процессе сгорания топлива в камере свечи. При повороте ключа зажигания в первое положение происходит предварительный разогрев спирали свечи до 1000°C в течении 1-2х мин. В момент прокручивания коленчатого вала двигателя стартером открывается электромагнитный клапан обеспечивающий подачу топлива к свече по средствам подкачивающего насоса. Более подробно принцип действия системы описан в работе [3] автора Акимова С. В. и работе [61] автора Резника А. М. Такой подогрев обеспечивает пуск дизелей при температуре окружающего воздуха до минус 25°C [61].

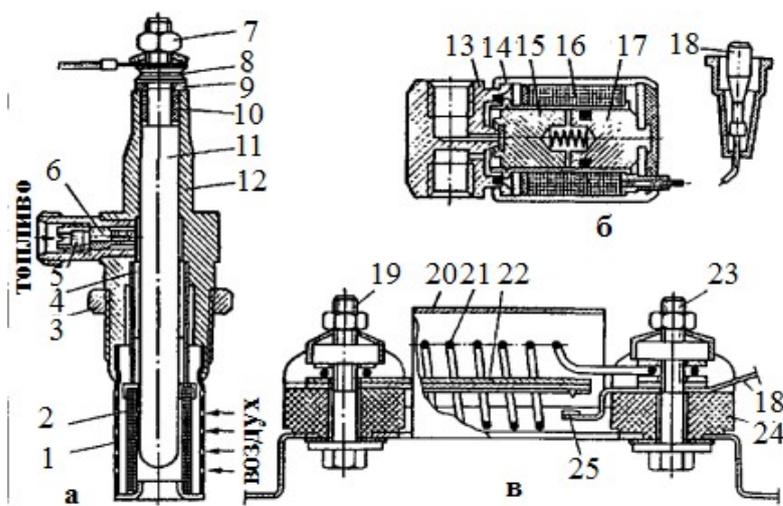


Рисунок 1.6– Электрофакельные устройства: а)– факельная штифтовая свеча 13.3740 с – б) электромагнитный топливный клапаном 13.3741; в)– добавочный резистор с термореле: 1– защитный экран; 2– испарительная сетка; 3, 7, 8– гайки; 4– испаритель; 5– фильтр; 6– топливный жиклер; 9– изоляционная шайба; 10– изоляционная втулка; 11– нагреватель; 12– корпус свечи; 13– основание клапана; 14– гильза; 15– якорь; 15– катушка; 17– сердечник; 18– штекер; 19, 23– выводы; 20– защитный кожух; 11– спираль добавочного резистора; 22– биметаллическая пластина с подвижным концевиком; 24– изолятор; 25– неподвижный контакт.

1.3.4 Автономные подогреватели охлаждающей жидкости и воздушные отопители

Популярными представителями систем облегчения пуска двигателей являются автономные воздушные отопители и подогреватели охлаждающей жидкости. Лидерами по производству таких приборов являются немецкие производители Webasto и Eberspacher.

Известными отечественными подогревателями охлаждающей жидкости являются предпусковые жидкостные подогреватели (ПЖД) и подогреватели отопители производства Шадринского автоагрегатного завода, автономные отопители «Теплостар» от компании «Адверс», отопители «Элтра-Термо» компании с тем же названием.

Отопители и подогреватели подобного типа сконструированы и работают по общему принципу (рисунок 1.7). Эти приборы устанавливаются в разрез системы охлаждения двигателя. Охлаждающая жидкость циркулируя, с помощью встроенного насоса, через теплообменник прибора нагревается от камеры сгорания находящейся внутри теплообменника подогревателя, тем самым снабжая теплом весь двигатель. В начале работы посредством электроклапана отопителя происходит продувка камеры сгорания для удаления остатков продуктов горения. Свеча накаливания, разогреваясь в результате подачи на нее напряжения, воспламеняет топливовоздушную смесь. Дозировочный насос подает топливо в камеру сгорания, туда же с помощью встроенного электроклапана поступает необходимое количества воздух. Разгоняясь до скорости примерно 50 м/с воздух в горелке смешивается с топливом, воспламеняется и разогревает камеру сгорания. После прогрева топливо самовоспламеняется от горячих стенок камеры сгорания, а свеча накаливания выключается. Процесс горения контролируется и управляется на основании показателей датчиков температуры и перегрева охлаждающей жидкости.

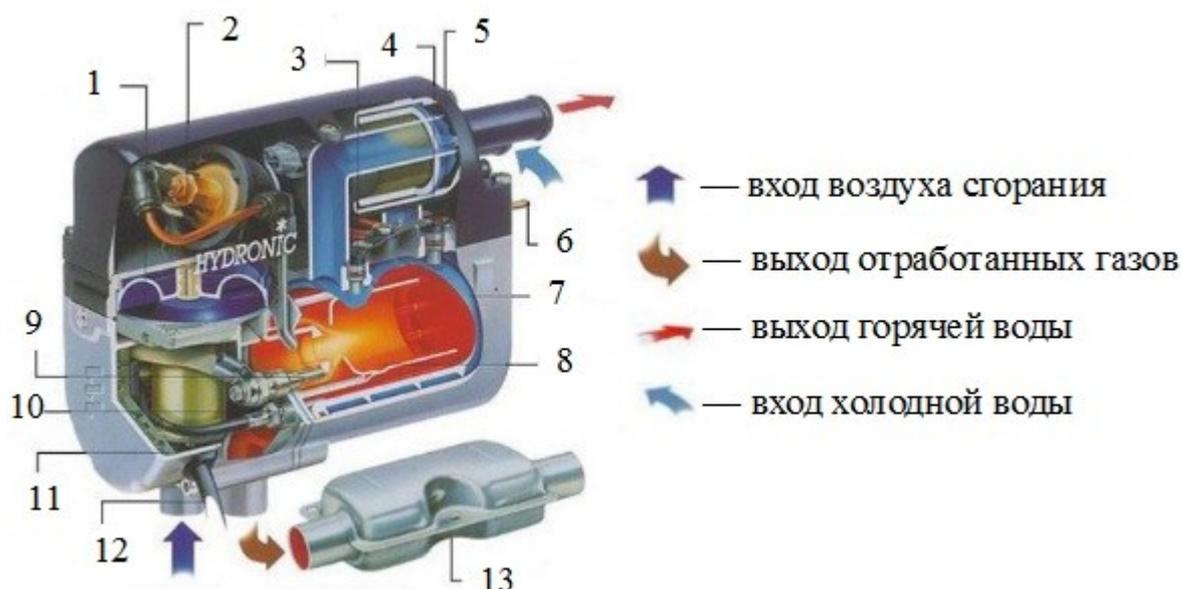


Рисунок 1.7 – Принцип действия подогревателя охлаждающей жидкости:

1– вентилятор; 2– дозированный топливный насос; 3– датчик температуры; 4– датчик перегрева; 5– водяной насос; 6– подача топлива; 7– теплообменник; 8 – камера сгорания; 9– свеча накаливания; 10– датчик пламени; 11– блок управления; 12– соединительный кабель; 13– глушитель отработавших газов

В качестве свечи может применяться искровая, спиральная или в следствие меньшей теплопроводности и большей теплостойкости чем металл, керамический штифт. Такая свеча потребляет меньшее количество тока и быстро разогревается, тем самым время достижения отопителем полной мощности существенно сокращается. Камера сгорания, как правило выполнена из нержавеющей стали и может иметь различные конструкции. Так же данные системы могут отличаться по компоновке и способу управления, программным обеспечением и функциями, конструкциями камер сгорания. Напряжение питания таких приборов 12 – 24В, тепловая мощность колеблется в пределах 1.5 – 70 кВт.

На рисунке 1.8 отражен принцип работы автономных воздушных отопителей. Стрелками синего цвета показано движение холодного воздуха, красными соответственно нагретого. Принцип работы отопителей схож с жидкостными подогревателями и отопителями. Разница заключается в том что камера сгорания вместо жидкости, охлаждается потоком нагнетаемого воздуха встроенным венти-

лятором. Назначение таких приборов не совсем подходит для облегчения пуска двигателей, как правило, они применяются для обогрева салона транспортных средств. Однако для малогабаритных дизелей находящихся в специальном кожухе, либо работающих в отдельном отсеке, разогрев замкнутого пространства позволил бы равномерно распределить тепло по всему двигателю а так же прогреть воздух на впуске, тем самым сохранить ресурс двигателя.

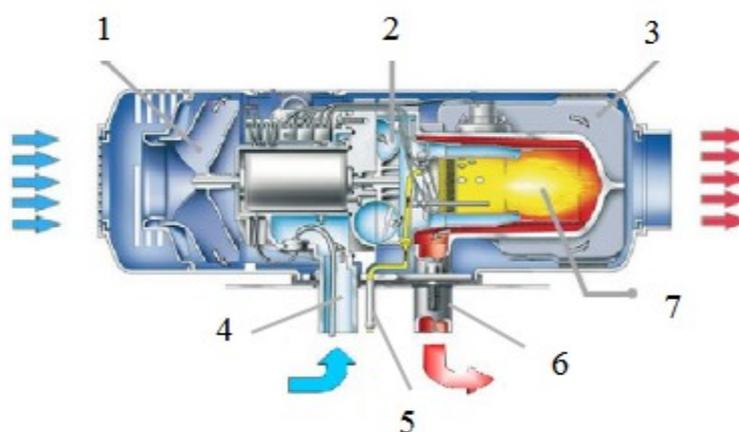


Рисунок 1.8– Принцип работы автономных воздушных отопителей:

1– вентилятор прокачки воздуха из салона; 2– вентилятор прокачки воздуха с улицы для сгорания; 3– теплообменник; 5– патрубок забора воздуха; 6– патрубок отвода отработавших газов; 7– камера сгорания

Характеристики и особенности работы различных подогревателей и отопителей достаточно полно представлены в работе [45].

1.3.5 Нагреватели с источником питания 220В

На ряду с рассмотренными системами облегчения пуска двигателей, довольно частое применение находят нагреватели с источником питания 220В. Вызвано это простотой использования, легкостью в установки и дешевизной. Конструкция таких приборов и систем позволяет их установку, как правило, в блок цилиндров, либо в разрез патрубка охлаждающей системы, либо посредством соединения с системой охлаждения шлангами. В основе работы таких приборов лежит подо-

грев с помощью электрической энергии и теплообмен в жидкой среде. Сам нагреватель представляет собой отрезок цилиндрической трубы, в которую впаян нагревательный элемент. Такие подогреватели, как правило, подключаются к внешнему источнику питания, что осложняет их использование. Мощность таких приборов сравнительно не велика, тем самым устанавливается тепловой баланс и отсутствует возможность перегрева охлаждающей жидкости, однако время прогрева значительно возрастает.

Выносные системы функционирующие по этому принципу представляют более сложную конструкцию и оснащаются дополнительным циркуляционным насосом, терморегулятором, датчиком температуры, блоком управления с возможностью выполнять дополнительные функции по зарядке аккумуляторных батарей и т.п.

Так же в последнее время становятся все более популярными так называемые нагревающие пластины, подогревающиеся топливные шланги, хомутовые подогреватели. Мощность нагревательных пластин составляет 100 – 1500 Вт, а температура нагрева до 600°C [83]. Более детально эти устройства рассмотрены в [45, 83].

На основании метода морфологического анализа была предложена классификация систем облегчения пуска ПДВС при отрицательных температурах воздуха окружающей среды представленная в таблице 1.2.

Анализируя устройство и принцип действия рассмотренных систем облегчения пуска стоит обратить внимание на решения связанные с интегрированием электрических автономных нагревателей в конструкцию впускной системы ПДВС. Такие решения наиболее предпочтительны для дизеля, так как в этом случае резко увеличивается температура в камере сгорания необходимая для образования первых вспышек. К преимуществам такого решения можно отнести простоту конструкции, надежность, сравнительно низкие энергозатраты и себестоимость.

Таблица 1.2

Классификация систем облегчения пуска ПДВС при отрицательных температурах

Признак	Вариант исполнения признака							
	1	2	3	4	5	6	7	
Конструктивное исполнение	Автономные		Стационарные	Локальные. Вмонтированные в подогреваемую систему ДВС				
	Подогреватель охлаждающей жидкости	Воздушные отопители						
Вид нагрева	Электрический 12В	Электрический 24В	Электрический 220В	Электрофакельный	Водяным паром	Открытым пламенем	Электропневмофакельный	
Подогреваемая система (узел) ДВС	ДВС	Блок-картер	Система Охлаждения	Система смазки (масло в картере)	Воздух на впуске ДВС			
Тип нагревательного элемента	Свеча закрытого типа (штифтовая)	Свеча открытого типа	Спиральный нагреватель	Хомутовый нагреватель	Пластинчатый нагреватель	СВЧ нагреватель	Полупроводниковый нагреватель (позистор)	Силиконовые пластины

1.4 Анализ научных трудов посвященных вопросам облегчения пуска дизельных двигателей

Существенный вклад в исследование пуска поршневых двигателей внесли Анисимов И.А., Бондарь В.Н., Бабичев А.А., Боровиков В.Ф., Денешко Л.В., Журавский Б.В., Ильчук И.А., Крохта Г.М., Калинин Д.С., Кочетков П.В., Марков В.А., Новопашин Л.А., Патрахальцев Н.Н., Смолин А.А., Трофимова Д.А., Ташкевич Л.Н., Харитонов В.В., Чудов В.И., Шавлов А.В., Шишков В.В. и др.

Рассмотрим основные подходы к решению проблемы облегчения пуска дизелей в условиях низких температур.

В работе [13] авторы выделили три основных условия надежного пуска двигателя:

- создание в зоне будущего воспламенения необходимой концентрации паров топлива и воздуха;
- своевременный подвод тепловой энергии в зону воспламенения, а также необходимое количество этой энергии;
- снижение момента сопротивления коленчатому валу.

Выявлены наиболее рациональные направления повышения пусковых характеристик бензиновых и дизельных двигателей.

В работе [26] по сверхвысокочастотному (СВЧ) нагреву технических жидкостей авторами было разработано устройство подогрева и поддержания оптимальной температуры масла в транспортных средствах и технологических машинах. Подогрев технической жидкости в устройстве осуществляется СВЧ нагревателем, а поддержание температуры осуществляется ее фиксацией с помощью термодатчика и включением и выключением излучателя блоком управления.

В работе [42] приводятся полученные с помощью ЭВМ расчетные зависимости температуры топлива от времени нагрева при различной мощности СВЧ-излучателя. Установлено что на оптимизацию диаметра капель топлива и однородность распыливания существенное влияние оказывает время нагрева и мощность СВЧ – устройства.

Авторы Ильчук И.А. Калинин Д.С. Трофимова Д.А. в своей работе [27] описывают гидропневматическую систему пуска двигателя через элементы коробки передач с возможностью повторного пуска посредством ручного насоса. В статье демонстрируется интересное конструкторское решение. Однако такая система видится достаточно громоздкой, увеличивающей сложность конструкции и эксплуатации двигателя, а так же увеличиваются его габариты.

Боровиковым В.Ф. в работе [6] при оценки эффективности пуска тракторного дизеля Д-144 установлено что повышение температуры начала сжатия на 1 К позволяет повысить среднеобъемную температуру воздушного заряда в конце такта сжатия приблизительно на 1 К, тем самым значительно повысить пусковые качества дизеля интенсивным подогревом впускного воздуха. Экспериментально подтверждено что с помощью интенсивного прогрева впускного воздуха существенно сокращается время пуска дизеля, повышается стабильность пусковых характеристик, сокращается до 1 секунды время выхода дизеля на режим максимальной частоты вращения холостого хода дизеля. Учитывая низкий уровень динамики рабочего цикла дизеля и высокую эффективность способа интенсивного прогрева впускного воздуха, автор считает целесообразным дополнять пусковые системы дизелей подогревателями впускного воздуха, имеющими высокую эффективность и низкое гидравлическое сопротивление воздушному потоку, а так же рекомендует сезонное использование таких устройств или их расположение в байпасных впускных трубопроводах.

В работе [31] автора Крохты Г.М. рассмотрены особенности пуска дизельного двигателя 6ЧН 13/11 в условиях низких температур. Рассмотрена неполнота сгорания топлива в период после пускового прогрева как фактор увеличения времени прогрева двигателя. Предложены методики оценки неполноты сгорания топлива и эффективности полезного использования теплоты израсходованного топлива. Получено минимальное значение температуры масла в двигателе, при котором происходит стабилизация внутренних мощностных потерь на трение. Предложены способы сокращения времени прогрева силовой установки техники в послепусковой период.

В исследовании [7] автором Бондарем В.Н. приведены результаты экспериментального исследования пуска тракторного двигателя 4ЧН15/20,5 в климатической камере при температуре окружающего воздуха минус 30 °С и минус 40 °С.

В первом варианте двигатель был оснащен, в качестве средств предпусковой подготовки, электростартерной системой пуска, предпусковым подогревателем Eberspacher «Hydronic M-12» мощностью 12 кВт осуществляющим нагрев охлаждающей жидкости и масла в поддоне картера, а так же маслозакачивающим насосом без подогрева.

Во втором варианте дизель запускался пусковым двигателем П23У. Выхлопные газы направлялись в поддон картера дизеля для обогрева масла и частично на подогрев маслозакачивающего насоса.

По результатам испытаний были построены зависимости температур прогрева от времени. Анализ полученных выводов позволил дать рекомендации по совершенствованию конструкции двигателя и трактора, позволяющей улучшить эксплуатационные характеристики в условиях холодного климата.

В работе [8] посвященной оценке пусковых характеристик дизелей размерности 13/14, тем же автором, приведены результаты испытаний пуска дизелей Д-442И и Д-461И с индивидуальными головками цилиндров в условиях низких температур. Использовалась различная комплектация дизелей:

- a) С электростартерной системой пуска;
- b) С применением пускового двигателя с двухскоростным редуктором;
- c) С электрофакельным подогревом воздуха на впуске и без него;
- d) С предпусковым подогревателем охлаждающей жидкости и без него.

В результате были сделаны выводы об эффективности применяемых средств облегчения пуска при низких температурах, получены характеристики прокручивания коленчатого вала и продолжительности пуска дизелей.

В статье [67] автора Чудова В.И. приводятся теоретические аспекты снижения минимальной пусковой частоты дизельного двигателя. Показано влияние степени сжатия, конструкции коленчатого вала, камеры сгорания, цилиндра, способа

смесеобразования на минимальную пусковую частоту вращения коленчатого вала дизеля

Новопашин Л.А., Денешко Л.В., Кочетков П.В. в своей работе [47] предлагают автономный разогрев дизеля путем подачи теплого воздуха в картер двигателя через маслозаливную горловину. Получено что при температуре теплоносителя плюс 100 °С температура подшипника за 15 минут разогрева увеличится от минус 20 °С до плюс 43,5 °С, а при температуре теплоносителя плюс 200 °С температура подшипника изменилась от минус 20 °С до плюс 96,5 °С. На этом основании был сделан вывод что увеличение температуры подшипника пропорционально увеличению температуры теплоносителя.

Этими же авторами в работе [48] предложено мобильное устройство для облегчения пуска автотракторных дизелей, работающее на природном газе. Представлена методика теоретического расчета термодинамического процесса сжатия в цилиндре двигателя при пуске. Представлены результаты расчета теплового баланса сжатия в дизеле при пуске. Получено что тепло использованное для эффективного пуска дизеля при температуре окружающей среды минус 20 °С составляет всего около 50%.

Ташкевичем Л.Н. и Журавским Б.В. в работе [64] проведен анализ факторов влияющих на пуск дизеля в условиях отрицательных температур, предложена система комплексного подогрева дизельного двигателя. Особенностью предложенной системы является наличие дополнительного электрического масляного насоса а так же оптимальное распределение электрической энергии аккумуляторной батареи между потребителями. Продолжительность подогрева основных систем двигателя определяется блоком управления по средствам чувствительных элементах расположенных подогреваемых узлах. Система способна предотвратить глубокий разряд аккумуляторных батарей (АКБ). Недостатком предложенной системы является большое количество электроники.

В диссертационном исследовании Харитонов В.В. [66] в целях повышения эффективности пусков «холодного» дизеля при отрицательных температурах окружающей среды представлен разработанный им метод организации «холодно-

го» пуска дизеля с использованием ЛВЖ. Суть метода заключается во впрыскивании ЛВЖ внутрь цилиндра в конце такта сжатия через клапаны регулирования начального давления, регулировании состава смесового топлива во время процесса разгона после пуска, отключении цилиндров и циклов на режимах разгона после первых успешных вспышек. Представлено описание системы топливоподачи и принцип ее работы. Разработана математическая модель режимов пуска - разгона, позволяющая проводить поиск рациональных условий проведения указанных режимов пуска. Проведены численные эксперименты и выявлены режимы эффективного проведения пусков -разгонов. Представлены результаты исследований пусков при температурах от минус 15 °С до минус 20 °С без применения средств облегчения пуска и со средствами облегчения пуска.

Особый интерес представляет диссертационное исследование [72] автора Шишкова В.В. посвященное исследованию показателей рабочего цикла дизеля при пуске подогревом впускного заряда продуктами сгорания пускового двигателя и с помощью ЭФП. В данной работе проведен анализ закономерностей влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на пусковые качества дизелей, анализ особенностей внутрицилиндровых процессов при подогреве впускного воздуха продуктами сгорания топлива. Разработана и представлена математическая модель внутрицилиндровых процессов дизеля применительно к условиям пуска, а так же методика анализа рабочего цикла дизеля по индикаторной диаграмме с использованием ЭВМ. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния содержания кислорода во впускном заряде и температуры заряда на показатели рабочего цикла дизеля при пуске. По результатам проведенных экспериментов определено, что наличие во впускном заряде продуктов сгорания, а так же понижение плотности заряда снижают индикаторную работу цикла. Важным заключением является то, что при пуске в условиях низких температур, необходимо стремление к минимальной степени подогрева впускного воздуха достаточной для воспламенения топлива. Целесообразное значение величины цикловой подачи в таких условиях пуска является функцией степени подогрева и должно быть тем ниже, чем выше подогрев впускного воздуха. Численное значе-

ние цикловой подачи при этом должно быть таким, чтобы коэффициент избытка воздуха составлял 1,1...1,2.

В исследовании Шавлова А.В. [69], направленном на повышение пусковых характеристик дизеля посредством снижения сопротивления проворачиваемости коленчатого вала путем совершенствования системы термостатирования масла, теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что представленная в работе система с рекомендованными конструктивными параметрами и режимами работы позволяет:

- повысить перед пуском (без использования ПЖД) температуру масла в главной масляной магистрали на 10 °С...23 °С, в картере на 5 °С...10 °С, условную среднюю температуру дизеля на 7 °С...8 °С;

- уменьшить время на предпусковую подготовку на 1...2 мин и обеспечить гарантированный пуск дизеля при температурах окружающего воздуха минус 25 °С за 5...8,5 минут, минус 50 °С за 21...28 минут;

- обеспечить удовлетворительное состояние поверхностей трения деталей, к которым масло подается под давлением (коленчатый и распределительные валы, детали передачи, масляный насос) в процессе пуска дизеля с комбинированной системой подготовки запуска и системой термостатирования масла.

Данные исследования проводились на дизеле типа В-2 с комбинированной системой подготовки запуска.

Таким образом, основываясь на приведенных результатах анализа материалов по облегчению пуска дизельных двигателей в условиях отрицательных температур окружающей среды можно сделать вывод о том что, не смотря на высокий уровень проведенных исследований, не уделено достаточного внимания малоразмерным дизелям с воздушным охлаждением и работе дизелей в условиях арктических температур воздуха окружающей среды ниже минус 40 °С.

1.5 Обзор запатентованных технических решений подогрева впускного воздуха в ПДВС

Наряду с общеизвестными системами и устройствами подогрева впускного воздуха, рассмотренными в п. 1.2 и п. 1.3, стоит обратить внимание на ряд технических решений, запатентованных в последнее время.

Техническое решение, представленное в патенте РФ 2525778С2 Болштыанским А.П., Щербой В.Е., Болштыанским А.А. [85], заключается в способе пуска ПДВС в условиях низких температур, путем подачи подогретого топлива во впускной патрубков, отличающимся тем, что подогрев топлива производят вне моторного отсека автотранспортного средства до температуры его испарения, в том числе равной температуре его кипения. Через подогретое топливо во время пуска двигателя пропускают атмосферный воздух и направляют его вместе с топливом во впускной патрубков. Способ реализуется при помощи агрегата содержащего емкость, частично заполненную топливом, и устройством для ее подсоединения к впускному патрубку двигателя, в нижней части емкости устанавливают устройство для подогрева топлива.

Рассматриваемое устройство представляет собой достаточно сложную систему с использованием сжатого воздуха, подводом топлива, электромагнитным управлением подачи и распыления топлива, а так же с управлением его нагрева.

В патенте РФ 2595294С2 авторами [86] предложен способ подогрева впускного воздуха в двигателе внутреннего сгорания, заключающейся в размещении нагревательного устройства вблизи распределительного узла, в котором впускные трубопроводы сливаются с формированием общего впускного трубопровода (для многоцилиндрового ПДВС). Нагревательное устройств раскрыто в описании немецкого патента DE 10214166 А1, содержит ленточные нагревательные элементы, нагреваемые электрическим способом и обладающие контуром с прямоугольным поперечным сечением. Нагревательные элементы расположены таким образом, что их прямоугольное поперечное сечение оказывает минимальное сопротивление всасываемому воздуху сгорания. Нагревательный элемент активируется во время

регенерации сажевого фильтра, а также когда вращающий момент двигателя и число оборотов двигателя падают ниже заданного минимального значения. В предлагаемом способе устройство подогрева активируют тогда, когда прекращена подача топлива в двигатель внутреннего сгорания, с целью уменьшения выбросов и расхода топлива. Таким образом, способ предполагает предварительный прогрев впускного воздуха для поддержания необходимой температуры.

В патенте РФ 2395707С2 Ереминым Б.Г. и соавторами [87] описан способ подогрева впускного воздуха ПДВС, основанный на впрыскивании, смешивании углеводородной смеси с воздухом. Первоначально часть всасываемого воздуха отделяют от общего потока, потребляемого двигателем, далее преобразовывают в низкотемпературную воздушную плазму, смешивают углеводородную смесь с воздухом, обрабатывают углеводородную смесь низкотемпературной воздушной плазмой в реакторе плазменного конвертера топлива, осуществляя конверсию и самовоспламенение полученной топливовоздушной смеси во впускном коллекторе посредством свечи накаливания, нагревая воздух во впускном коллекторе за счет теплоты сгорания топливовоздушной смеси. Способ предполагает подвод топлива и применение электронного блока управления с использованием микропроцессора с целью выработки сигналов на исполнительные механизмы.

Устройство авторов Жукова Л.В., Кравченко И.Н., Ивановского В.С., раскрытое в патенте РФ 150179U1 [88], содержит корпус, камеру сгорания, форсунку, теплообменник, запальную свечу и свечу подогрева впускного воздуха, в картер силовой установки установлен нагревательный элемент и датчик температуры моторного масла. Система относится к классу предпусковых подогревателей и одновременно осуществляет предварительный подогрев впускного воздуха, охлаждающей жидкости и масла в картере силовой установки.

Система впуска двигателя Карнаухова И.В. в патенте РФ 152094U1 [89], содержит впускную трубу, один конец которой подключен к цилиндрам двигателя, а другой к воздухоочистителю, причем в воздухоочистителе под воздушным фильтром установлен нагревательный элемент, отличающаяся тем, что указанный нагревательный элемент выполнен из газопроницаемого графитированного волок-

на и имеет конфигурацию воздушного фильтра. Указанный нагревательный элемент функционально запитан от бортового источника и имеет возможность регулирования мощности. Необходимость подогрева воздуха на впуске автор объясняет тем, что такое решение позволяет улучшить гомогенизацию топливовоздушной смеси. Особенно это актуально при работе дизельных двигателей, потому что все дизели работают на бедных смесях - коэффициент избытка воздуха не ниже 1,3, а при работе двигателя на холостом ходу коэффициент избытка воздуха может достигать 1,9-2,5. Поэтому в камере сгорания дизельных двигателей почти всегда находится, неостребованный кислород.

В патенте РФ 192116U1 [90] Козловым А.А. и соавторами представлен способ подогрева впускного воздуха дизелей типа В-2 индукционным подогревателем, работающим в сочетании с воздушным пуском. Стоит отметить, что в конструкции дизелей подобного типа предусмотрена стартер-генераторная установка способная развивать достаточно высокие пусковые обороты дизеля. Для подачи в вихревую камеру с нагревательным элементом холодного воздуха, в конструкции устройства предусмотрен электровентилятор. Такое решение обеспечивает циклический подогрев воздушного заряда не только в месте расположения нагревателя, но и в правом и левом впускных коллекторах воздуховоде и компрессоре дизеля. Представленный способ отличается высокой степенью автоматизации с использованием температурных датчиков и исполнительных механизмов.

В патенте РФ 184938U1 Литвиновым Р.С. и соавторами [91] раскрыто устройство подогрева воздуха на впуске, путем размещения внутри впускной трубы вставки, выполненной из металла с большой теплоемкостью, представляющее собой полый толстостенный выполненный из единой заготовки цилиндр с четырьмя расположенными по наружной поверхности, вдоль осевой линии трубы, опорными разделительными ребрами и вырезом для совмещения со свечой накаливания. Устройство содержит расположенную во впускной трубе двигателя внутреннего сгорания свечу накаливания со штуцером для подвода топлива. Прогрев воздуха осуществляется продуктами сгорания топлива и разогретой вставки обладающей большей теплоемкостью.

Назаровым А.В. и соавторами в патенте РФ 96188U1 [92], описано устройство подогрева впускного воздуха, выполненное из трубы с теплоизолированной стенкой и свечей накаливания с подводом к ней топлива. Устройство является близким к рассмотренному ранее и описанному в патенте РФ 184938U1, отличающееся от него конструктивными особенностями трубы-вставки.

Устройство Москалева В.С. Королькова А.И. Трофимова И.А., приведенное в патенте РФ 2696524C2 [93], представляет собой сравнительно сложную систему подогрева впускного воздуха, особенностью которой является наличие в конструкции обводящих воздушных контуров с тепловыми трубками, заполненными активным телом (смесь дистиллированной воды, аммиака, альдегидов). При работе двигателя отработавшие газы через парогенератор тепловых трубок передаются активному телу, нагревая его до кипения. Активное тело испаряясь, перетекает через паропровод в конденсатор, где он конденсируется на холодных поверхностях, отдавая тепловую энергию воздуху, поступающему в цилиндры двигателя по обводным контурам. Пульсирующий процесс возврата конденсата в парогенератор осуществляется автоматически за счет образовавшейся разницы давления жидкости и пара в течение одного цикла в рабочих объемах тепловых трубок. Система обладает высокой степенью автоматизации с наличием температурных датчиков и исполнительных механизмов.

Устройство Пенкина А.Л., Капустина А.А., Тишенина А.М., описанное в патенте РФ. 139004U1 [94], предназначено для предпускового подогрева воздуха во впускном коллекторе газовых двигателей внутреннего сгорания. Воздух нагревается термоэлектрическим нагревателем. Устройство содержит электронный блок управления, датчик температуры воздуха во впускном коллекторе, свечу накаливания в цилиндре двигателя, дополнительный воздухопровод впускного коллектора с внутренней заслонкой, управляемой электронным блоком управления, дроссельную заслонку, термоэлектрический нагреватель, управляемый электронным блоком управления.

Основной концепцией способа авторов Персифулл Р.Д. и Леоне Т.Г, описанного в патенте РФ 112869U1 [95], является возможность переключения подо-

грева впускного воздуха отработавшими газами и охлаждения выпускной системы при избыточном давлении на впуске. Система включает наличие электронного управления. Недостатком способа является отсутствие возможности предпускового разогрева.

Отличительной особенностью способа подогрева впускного воздуха представленного в патенте РФ 2295055С1 Родина С.В. [96] является наличие в устройстве подогрева дополнительного воздуховода впускного трубопровода для круговой циркуляции воздуха при подогреве, с встроенным в него электроклапаном и спиралью. Автор отмечает, что такое решение позволяет уменьшить мощность спирали. Так же устройство снабжено датчиком температуры воздуха электромагнитной форсункой, расположенной во впускном канале для впрыскивания запальной дозы топлива перед впускным клапаном. Впускной канал дополнительно снабжен перепускным каналом с клапаном, соединяющим объем впускного трубопровода с объемом цилиндра находящегося под поршнем для прогрева юбки поршня, который находится в фиксируемом положении после верхней мертвой точки на такте впуска, и частичной вентиляции блока-картера. К тому же автор отмечает, что для устойчивого воспламенения топливовоздушной смеси в цилиндре дизеля температура в конце сжатия должна быть от плюс 340 °С до плюс 345 °С.

В патенте РФ 111203U1 Цапкова В.И. [97] предложено устройство, технический результат которого заключается в подогреве поступающего воздуха и газа перед запуском двигателя. Работа устройства основана на сгорании газа, который подогревает впускной воздух. Регулирование и поддержание температуры впускного воздуха происходит автоматически.

Проведенный обзор запатентованных технических решений устройств подогрева впускного воздуха для ПДВС, позволяет отметить то, что способы подогрева характеризуются сложностью конструкции. Приоритетными решениями для многоцилиндровых двигателей являются способы с организацией горения подводимого во впуск топлива. Недостатки таких решений выражены в отложении продуктов горения во впускном канале и во впускных клапанах, а так же в сжигании

части кислорода впускного воздуха. Это объясняется значительным выделением тепла при горении топлива. Так же отмечается высокий уровень автоматизации устройств.

Несмотря на общую тенденцию к конструированию устройств подогрева впускного воздуха с применением принципа ЭФП (электрофакельный подогрев) следует учитывать и то, что повышение автоматизации, а так же каких-либо иных нетрадиционных способов организации выделения тепла увеличивает количество исполнительных устройств и датчиков, тем самым увеличивая вероятность количества отказов системы и, следовательно, снижая надежность всего двигателя.

Подогрев свежего заряда должен обеспечиваться компактными устройствами (с учетом размерности дизеля), но при этом для обеспечения надежного пуска, количество подогреваемого свежего заряда должно быть максимально возможным [90].

В качестве наиболее вероятного применительно к малогабаритному дизелю с воздушным охлаждением, видится техническое решение Родина С.В. [96]. Однако предусмотренное электронное управление и впрыск запальной дозы топлива на впуске, существенно усложняет конструкцию, повышает вероятность отказов, что неблагоприятно для эксплуатации, ремонта и обслуживания дизеля в условиях Арктики.

1.6 Выводы по первой главе. Постановка цели и задач исследования

Из проведенного обзора проблемы пуска дизеля в условиях отрицательных температур воздуха окружающей среды можно сделать следующие выводы:

1. В научной литературе не уделено достаточного внимания малогабаритным дизелям с воздушным охлаждением. Отсутствуют работы по осуществлению пуска и работе дизелей в условиях температуры воздуха окружающей среды ниже минус 40 °С.

2. Проведенный анализ работ позволяет сделать вывод, что процесс пуска становится более устойчивым и быстрее достигается бесперебойность в работе дизеля:

- при повышении степени сжатия и температуры конца сжатия;
- при использовании топлива с увеличенным цетановым числом;
- при выборе оптимального момента впрыскивания топлива;
- при применении свечей накаливания и искрового зажигания;

в сочетании с комплексом мероприятий по тепловой предпусковой подготовке дизеля.

3. Конструкция устройств и способы облегчения пуска в соотношении с себестоимостью должны обеспечивать надежность их применения, ремонтпригодность, а так же простоту и удобство эксплуатации для потребителя. Время предпусковой подготовки необходимо свести к минимально возможному.

4. В условиях арктических температур следует обратить внимание на энергопотребление системы, которое должно быть минимально возможным.

5. Эффективность и целесообразность применения различных систем зависит в первую очередь от климатических условий эксплуатации двигателя. Выбор применяемой системы следует ориентировать в первую очередь на минимальную температуру окружающей среды.

6. Первостепенной, наиболее сложной задачей для пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды является организация воспламенения, и горения топливовоздушной смеси в камере сгорания.

Наиболее эффективным решением, для облегчения воспламенения топливовоздушной смеси, в условиях отрицательных температур воздуха окружающей среды, является интенсивный разогрев воздуха поступающего в цилиндр. Это объясняется тем, что температура в конце такта сжатия определяется в первую очередь температурой в конце такта впуска.

Интенсивный разогрев воздуха поступающего в цилиндр приведет к уменьшению теплоотдачи заряда к стенкам цилиндра и камеры сгорания, а также повы-

шению скорости испарения основной дозы топлива, подаваемой в цилиндр вблизи верхней мертвой точки (ВМТ) на такте сжатия [96].

7. С целью сокращения времени предпусковой подготовки, для прогрева камеры сгорания и деталей системы впуска дизеля, предварительно разогретый воздух в обводном (байпасном) воздуховоде воздушного тракта, целесообразно подавать в цилиндр дизеля принудительно.

Организация круговой циркуляции воздуха в впускной системе через обводной воздуховод с встроенным в него электровентилятором и нагревательным элементом, позволяет уменьшить мощность нагревательного элемента [96].

Таким образом, выводы, сформулированные в первой главе, позволяют предположить наиболее перспективный способ пуска, а именно предусматривающий наличие во впускном тракте дополнительного обводного воздуховода с размещенным в нем устройством нагрева и циркуляции через корпус воздушного фильтра впускного воздуха, с последующей принудительной его подачей в цилиндр дизеля.

В соответствии с изложенным, **основной целью диссертации** является улучшение пусковых качеств малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур до минус 60 °С.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ проблемы пуска дизельного двигателя в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- провести анализ систем предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды;
- разработать математическую модель процессов предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением во всем диапазоне отрицательных температур окружающей среды;
- установить закономерности влияния конструктивных и эксплуатационных параметров дизеля на эффективность процесса пуска;

– провести экспериментальные исследования процессов предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды;

– разработать конструкцию (способ) предпусковой подготовки и пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур (до минус 60 °С).

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРЕДПУСКОВОЙ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1. Предварительные замечания

Рассматриваемый в работе объект исследования является серийным отечественным дизелем и свое основное назначение нашел в качестве привода генераторных установок постоянного и переменного тока.

В данной главе на основании производственных документов, к которым относятся:

- технические условия;
- программа и методика испытаний;
- руководство по эксплуатации

рассмотрены вопросы связанные с пуском дизеля в условиях низких температур.

Так же во второй главе представлена методика проведения пуска в условиях отрицательных температур окружающей среды для серийного дизеля. Проведен анализ пусков (работы) исследуемого дизеля при температуре до минус 50 °С, представлен обзор основных систем дизеля, проведен анализ применяемых на дизеле средств облегчения пуска, проведены экспериментальные исследование процессов предпусковой подготовки и пуска с применением штатных систем облегчения пуска. Сформулированы выводы по второй главе.

2.2. Обзор объекта исследования

В качестве объекта исследования выбран малогабаритный одноцилиндровый четырехтактный дизельный двигатель, отечественного производства, имеющий универсальное назначение и способный эксплуатироваться в различных кли-

матических условиях в диапазоне температур от минус 50 °С до плюс 50 °С, на высокогорье, при повышенной влажности и запыленности (рисунок 2.1.).

Подобного типа двигатели также производятся такими зарубежными компаниями, как Yanmar, Lambordini, Robin-Subaru, Kohler, Kipor, Hatz. Это все, как правило, короткоходные двигатели со степенью сжатия около 20 и воздушным охлаждением, но меньшего рабочего объема.

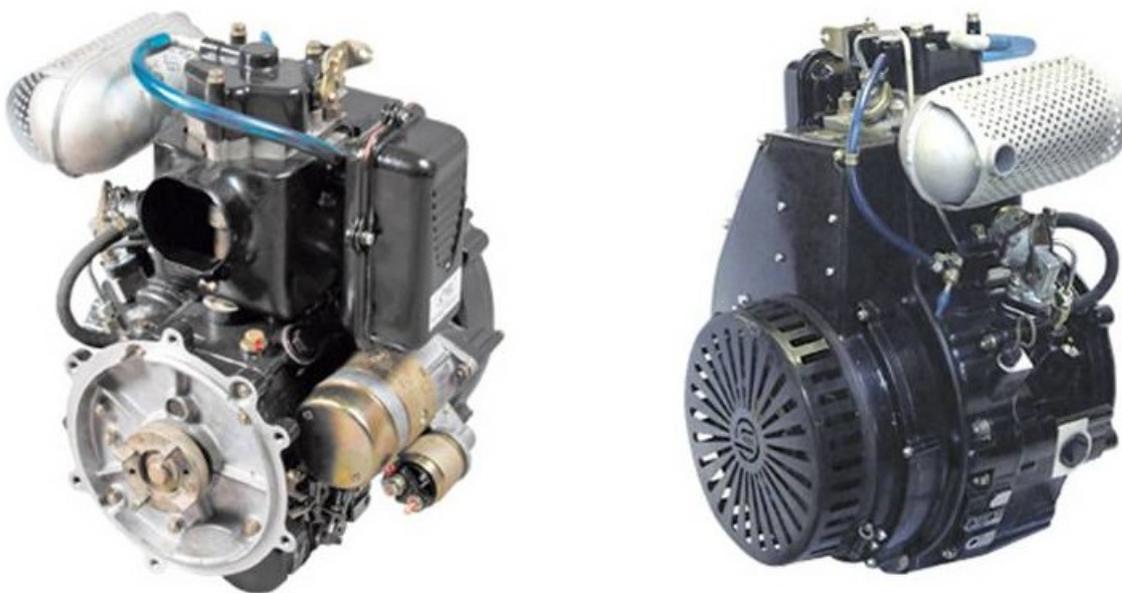


Рисунок 2.1 – Внешний вид дизеля

Технические характеристики дизеля представлены в приложении 1.

Перечень применяемых для работы дизеля технических жидкостей приведен в приложении 2.

2.3 Анализ пуска дизеля при отрицательных температурах окружающей среды

Анализируя порядок эксплуатации исследуемого дизеля при низких и сверхнизких температурах при проведении предпусковой подготовки допускается разбавление масла в картере бензином и не регламентированное применение легковоспламеняющихся жидкостей для облегчения пуска в зависимо-

сти от диапазона минусовых температур таких как «Арктика», «Холод Д-40» что негативно сказывается на деталях цилиндрико-поршневой группы [55].

Протоколы испытаний [98, 99, 100, 101] дизель-генераторной установки ДГУ8-П27,5-ВМ1 подтверждают удовлетворительные результаты пуска дизеля, являющегося приводом, и работы изделия при температуре до минус 40 °С. Данные испытания проводились конструкторским отделом двигателей АО «АК «Туламашзавод» в строгом соответствии с ОСТ ВЗ-2133-88 «Дизели военных гусеничных машин. Метод определения и оценки пусковых качеств на стенде» [82]. Продолжительность пуска при температуре окружающего воздуха минус 40 °С составляла не более 20 минут. Время от начала устойчивой работы до принятия нагрузки дизелем при температуре окружающего воздуха минус 40 °С, не более 5 минут. Запуск происходил с 1...3 попытки [98, 99, 100, 101].

В тоже время, при температуре окружающего воздуха минус 50 °С, результаты пуска дизеля, в основном, носят неудовлетворительный характер. Дизель после пуска работает неустойчиво, не развивает обороты и через 5...8 секунд глохнет. При чем при последующих попытках пуска стартером, не наблюдается появление вспышек в камере сгорания дизеля [98, 99, 100, 101].

Проведенный анализ протоколов испытаний позволяет сделать вывод о том, что при температуре окружающей среды ниже минус 40 °С, штатные средства облегчения пуска с трудом обеспечивают требуемый рост температуры в камере сгорания в момент такта сжатия, необходимый для воспламенения топливовоздушной смеси. При температуре окружающей среды ниже минус 50 °С такого роста не наблюдается.

2.4 Анализ методики пуска дизеля

Рассмотрим методику пуска [78] рассматриваемого дизеля при отрицательных температурах окружающей среды, в которой описан порядок мероприятий по предпусковой подготовке и проведению пуска.

В действующей методике пуск изделия разбит по температурным режимам окружающей среды:

- 1) от 0 °С до минус 20 °С;
- 2) от минус 20 °С до минус 40 °С;
- 3) ниже минус 40 °С.

Если на изделии применяется фильтр тонкой очистки с подогревателем топлива и электрическим топливным насосом, то во всех режимах включается подогреватель топлива.

При запуске до минус 20 °С первым производят включение подогревателя топлива. По истечению 2 - 3 минут с момента включения подогревателя топлива дизель прокручивают стартером в течении 7 секунд. Далее включают свечу накаливания в головке цилиндра на 30 - 40 секунд и по истечению этого времени производят пуск дизеля, подогреватель топлива и свеча накаливания при этом не выключается. Пуск производится электростартером. Продолжительность включения стартера 12-15 секунд. Время между попытками 15 секунд. После запуска дизеля и достижения им устойчивых оборотов свеча отключается.

При запуске от минус 20 °С до минус 40 °С в первую очередь включают подогреватель масла в картере дизеля на 15 минут. На 10 минуте производят включение подогревателя топлива. По истечению 15 минут подогреватель масла выключается, коленчатый вал прокручивается в ручную за шкив в обратном направлении до ощутимого сопротивления и включается свеча накаливания на 30 - 40 секунд. Далее производят пуск дизеля, аналогично, как и в первом режиме. Интервал между попытками в этом случае 30 секунд.

Пуск от минус 40 °С и ниже отличается от предыдущего режима временем включения подогревателя масла, которое составляет 25 минут, соответственно подогреватель топлива включается на 20-ой минуте, а так же разжижением масла в картере бензином, а топлива керосином ТС-1. Соотношение разбавления керосина с дизельным топливом (ДТ) представлено на рисунке.2.2.

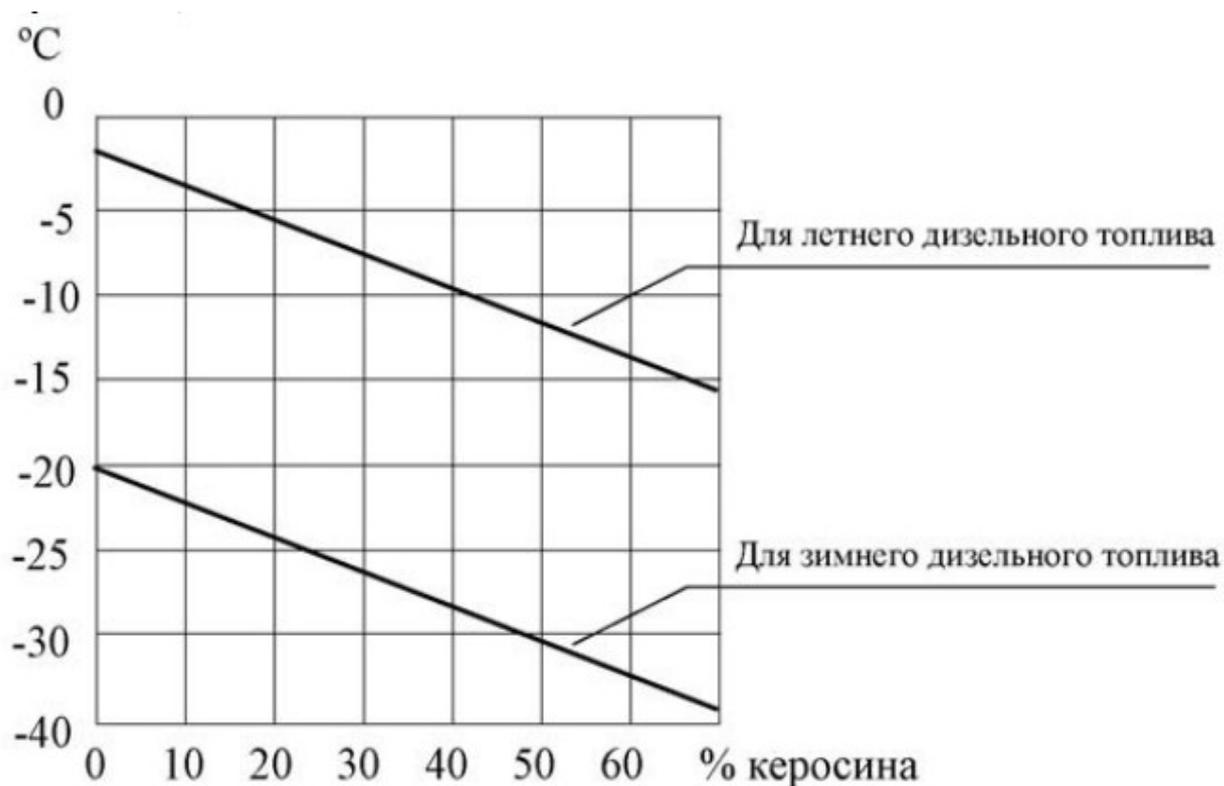


Рисунок 2.2 – Соотношение керосина с ДТ в зависимости от температуры окружающего воздуха

Для дизелей без подогревателя масла в картере разогрев осуществляется внешним источником [77].

Пуск обеспечивается двумя аккумуляторными батареями типа 6СТЭН-140М, включенными последовательно или двумя батареями типа 12СТ85Р1 включенными параллельно.

С целью удобства проведения сравнительного анализа, представленную методику можно представить в виде таблицы 2.1.

Режимы пуска исследуемого дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды

Температурный диапазон, (°С).	Разбавление масла керосином ТС1	Время включения подогревателя масла до пуска, (мин.).	Время включения свечи накаливания до пуска, (сек.).	Время включения подогревателя топлива до пуска, (мин.).
от 0°С до минус 20°С	–	работа подогревателя не предусмотрена	30 - 40	постоянно за 3 - 4 мин. до пуска
от минус 20°С до минус 40°С	–	15	30 - 40	постоянно за 5 - 6 мин. до пуска
от минус 40°С и ниже	да	25	30 - 40	постоянно за 5 - 6 мин. до пуска

Учитывая результаты пусков дизелей, рассмотренных в п. 2.3, приведенная методика обеспечивает уверенный пуск для диапазона температур от минус 20 °С до минус 40 °С. При температуре до минус 50 °С пуск не уверенный и возможен только с применением ЛВЖ.

Анализ рассмотренной методики позволяет сделать вывод о том, что в существующей методике не уделено достаточного внимания пуску дизеля при температуре окружающей среды t_{oc} от минус 40 °С до минус 60 °С.

2.5 Штатные средства облегчения пуска дизеля

В качестве систем облегчения пуска при низких температурах окружающей среды на дизеле применяются следующие устройства (рисунок 2.3):

- подогреватель масла (позистор), вмонтированный в нижнюю часть картера;
- подогреватель топлива в случае подачи топлива электрическим насосом;

– штифтовая свеча для принудительного воспламенения струи распыляемого топлива, установленная в головке цилиндра.

Характеристики перечисленных систем предпусковой подготовки облегчения пуска приведены в приложении 3, приложении 4, приложении 5.

Суммарная потребляемая электрическая мощность рассматриваемых систем составляет: 620 ± 50 Вт.

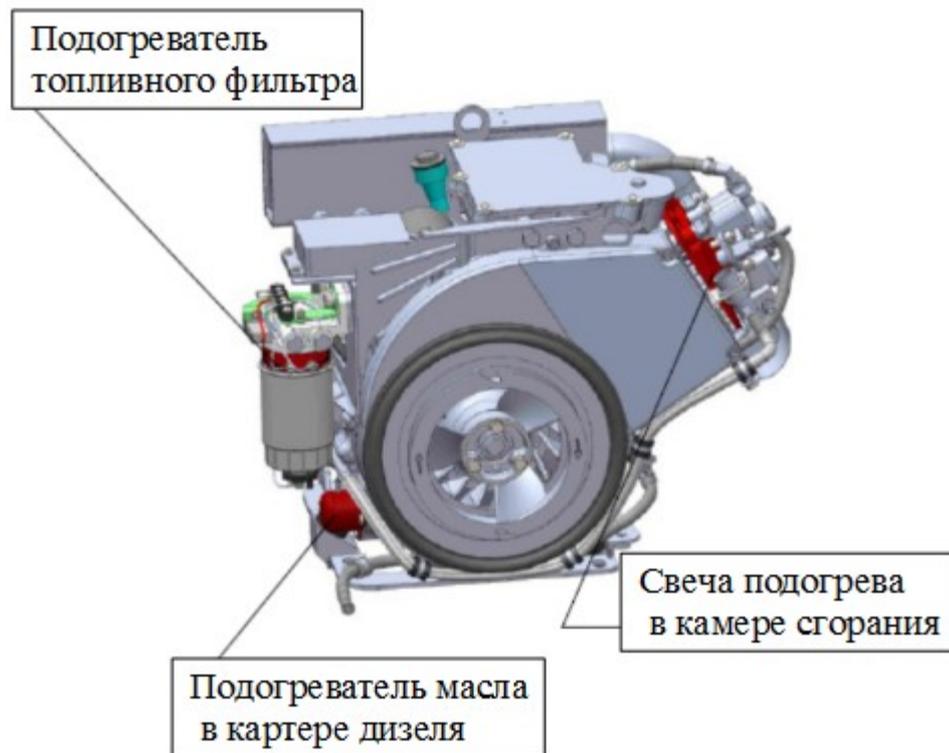


Рисунок 2.3– Схема расположения систем облегчения пуска дизеля

Поскольку данные системы были адаптированы для обеспечения пуска дизеля при температурах до минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, актуальной задачей является исследование его возможностей при арктических температурах окружающей среды ниже минус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.6 Экспериментальное исследование процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля с применением штатных систем облегчения пуска

Для определения возможности пуска дизеля в условиях арктических температур, первоначально необходимо провести оценку работы штатных систем облегчения пуска, определить среднюю пусковую частоту дизеля, а так же оценить изменение температуры в камере сгорания на режиме пуска при различных отрицательных температурах окружающей среды.

Экспериментальные исследования проводились в климатической камере отдела «Надежности» АО «АК «Туламашзавод».

Цель испытаний – оценка работы штатных систем облегчения пуска в условиях отрицательных температур окружающей среды. Оценка влияния температуры окружающей среды на изменение температуры в камере сгорания дизеля на режиме пуска. Определение средней пусковой частоты вращения коленчатого вала.

Объект испытаний – дизель 1Ч9,5/8,0 с наработкой 200 мото/часов.

Испытательное оборудование – климатическая камера КТВV 8000. Технические характеристики камеры приведены в приложении 6.

Измерительное оборудование:

- термопары типа ТД 701Е, ТД 714Е для измерения изменения температуры масла в картере дизеля. Инерционность термопар составила 5 сек;

- устройство измерения Термодат–10К6;

- термопара хромель-копель с диаметром проволоки 0,2 мм для измерения средней температуры в камере сгорания дизеля. Инерционность термопар составила 2 сек.

- вольтметр универсальный В7-78/1 с погрешностью измерений 0,35 мкВ.

- осциллограф UNI–T UTD 2025c1 [79];

- датчик частоты вращения коленчатого вала (синхронизации) 23.3847[80].

Расчет инерционности используемых термопар приведен в приложении 7. Тарировка хромель-копелевого спая приведена в приложении 8. Погрешность измерений температур составляет ± 1 °С. Погрешность измерений средней пусковой частот составляет ± 1 Гц.

2.6.1 Оценка эффективности работы штатного подогревателя масла в картере дизеля и определение закономерности прогрева

Для условий арктических температур окружающей среды актуальной задачей является установление закономерностей изменения состояния моторного масла. Температура окружающей среды существенно влияет на вязкость масла. С понижением температуры вязкость масла резко увеличивается [13, 50, 63]. Таким образом важно оценить интенсивность прогрева масла штатным подогревателем масла.

Оценка изменения температурного состояния проводилась при температурах окружающей среды t_{oc} от минус 10 °С до минус 60 °С, с выдержкой в камере до трех часов с момента выхода температуры масла на задаваемый режим. Дизель помещали в климатическую камеру. В качестве смазывающей жидкости в картер дизеля, для снижения вязкости, заливали смесь моторного масла М-4_з14Д с бензином. Доля бензина составляет 25 % от количества заливаемой смеси. Общее количество смеси с учетом бензина составило $1,8 \pm 0,1$ литра. В картер дизеля через отверстие под масляный щуп устанавливали термопару и подключалась к измерителю температуры типа «Термодат». В качестве датчика температуры использовались хромель-копелевые термопары типа ТД 701Е, ТД 714Е. При нахождении дизеля в камере с заданным соответствующим температурным режимом окружающей среды, включали подогреватель масла расположенный в картере дизеля и фиксировали изменение значения температуры масла на устройстве измерения.

На рисунке 2.4 приведены результаты измерений изменения температуры масла в картере в зависимости от времени работы штатного подогревателя при t_{oc} от минус 10 °С до минус 60 °С.

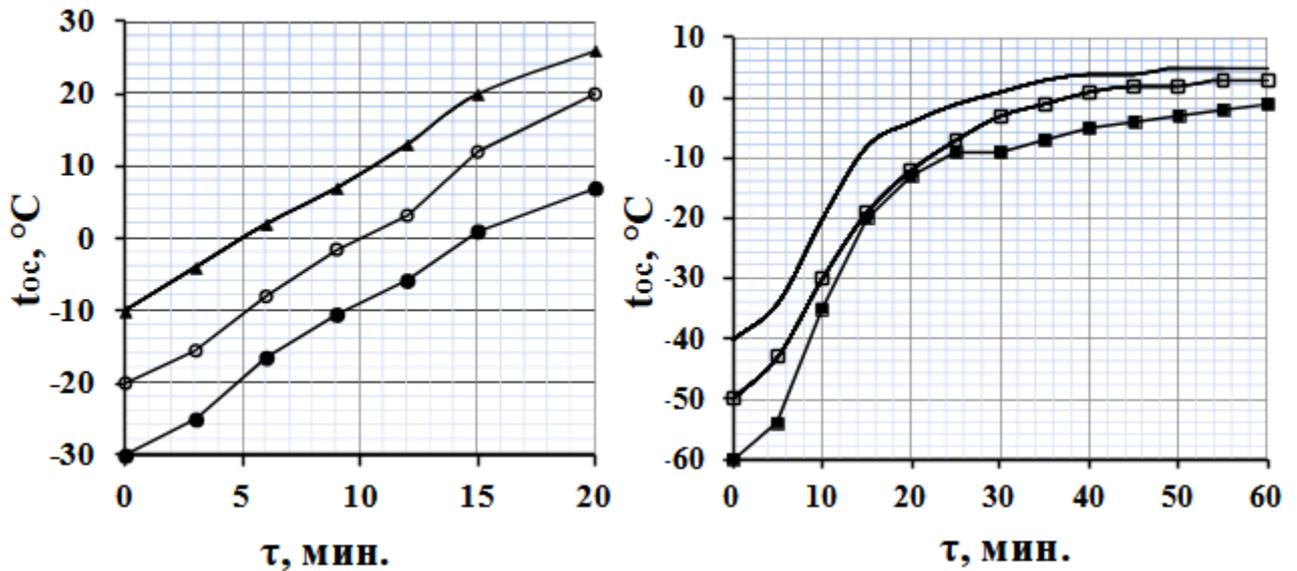


Рисунок 2.4.– Зависимость изменения температуры масла в картере дизеля от времени работы штатного подогревателя при t_{0c} от минус 10 °С до минус 60 °С

Таблица 2.2

Время прогрева масла в картере дизеля до 0°С

Температура окружающей среды, (°С).	Количество масла, заливаемое в картер дизеля, (л).	Мощность нагревательного элемента картере дизеля, (Вт).	Время прогрева масла в картере дизеля до 0°С, (мин.).
Минус 20	1,8±0,1	300±30	10
Минус 40	1,8±0,1	300±30	25
Минус 60	1,8±0,1	300±30	60

Приведенные на рисунке 2.4 и результаты, свидетельствуют о необходимости увеличения времени прогрева масла для условий эксплуатации при арктических температурах окружающей среды, учитывая эффективное время прогрева при работе штатного подогревателя масла.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том что, с использованием нагревателя масла мощностью 300±30 Вт в картере дизе-

ля со смесью до $1,8 \pm 0,1$ литра, минимальное время прогрева масла при температуре окружающей среды минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, в области расположения подогревателя составит не мене 40 минут (таблица 2.2).

2.6.2 Определение изменения температуры в камере сгорания на стадии предпусковой подготовки и пуска дизеля. Определение средней пусковой частоты

Одним из важнейших параметров, влияющих на процесс пуска дизеля, является температура в камере сгорания и пусковая частота при которой эта температура достигается.

Для проведения исследований дизель с термопарами и датчиком частоты вращения был помещен в климатическую камеру. В головку цилиндра устанавливалась препарированная топливная форсунка, на конце распылителя которой находился хромель-копелевый спай. От спая, через форсунку, герметично пропускали провода и подключали к вольтметр В7-78/1, с помощью которого фиксировалось термо-ЭДС. Так как форсунка крепилось в штатное место головки цилиндра, чувствительный элемент находился непосредственно в середине камеры сгорания, когда поршень достигал положения ВМТ. Дополнительно термопара была установлена на внешней поверхности головки цилиндра между ребрами охлаждения камеры сгорания (рисунок 2.5).

Для оценки изменения пусковой частоты дизеля выходные контакты датчика положения коленчатого вала подключали к осциллографу.

Исследования проводились при t_{oc} от минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ через каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, с включением подогревателя масла и свечи накаливания, по методике экспериментальных исследований составленной на основе руководства по эксплуатации ДГУ с исследуемым дизелем [78]. Учитывая проведенные исследования представленные в п.2.6.1 время прогрева масла при t_{oc} минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ было увеличено до 40 минут. Картер дизеля заполняли смесью моторного масла М- 4з/14Д с бензином. Количество бензина в масле составляло 25 % от количества заливаемой смеси.

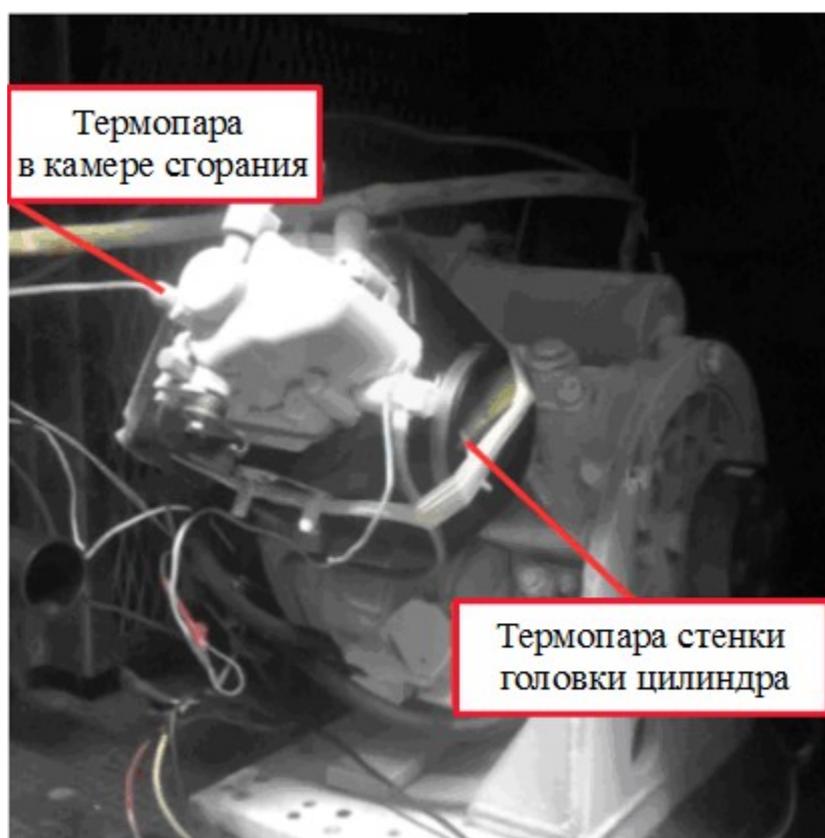


Рисунок 2.5 – Фото дизеля в климатической камере при температуре окружающей среды минус 60°C

Исследования проводились на стадии прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером без подачи топлива, с имитацией трехкратного пуска дизеля в течение 10 секунд с интервалом в 30 секунд между попытками. Свеча накаливания при этом не выключалась. Технические характеристики электростартера приведены в приложении 9. Пуски осуществлялись аккумуляторными батареями 12СТ85Р1 подключенными параллельно и вынесенными за пределы климатической камеры. Степень заряда АКБ не менее 70 %.

Основные результаты эксперимента приведены на рисунках 2.6 – 2.10.

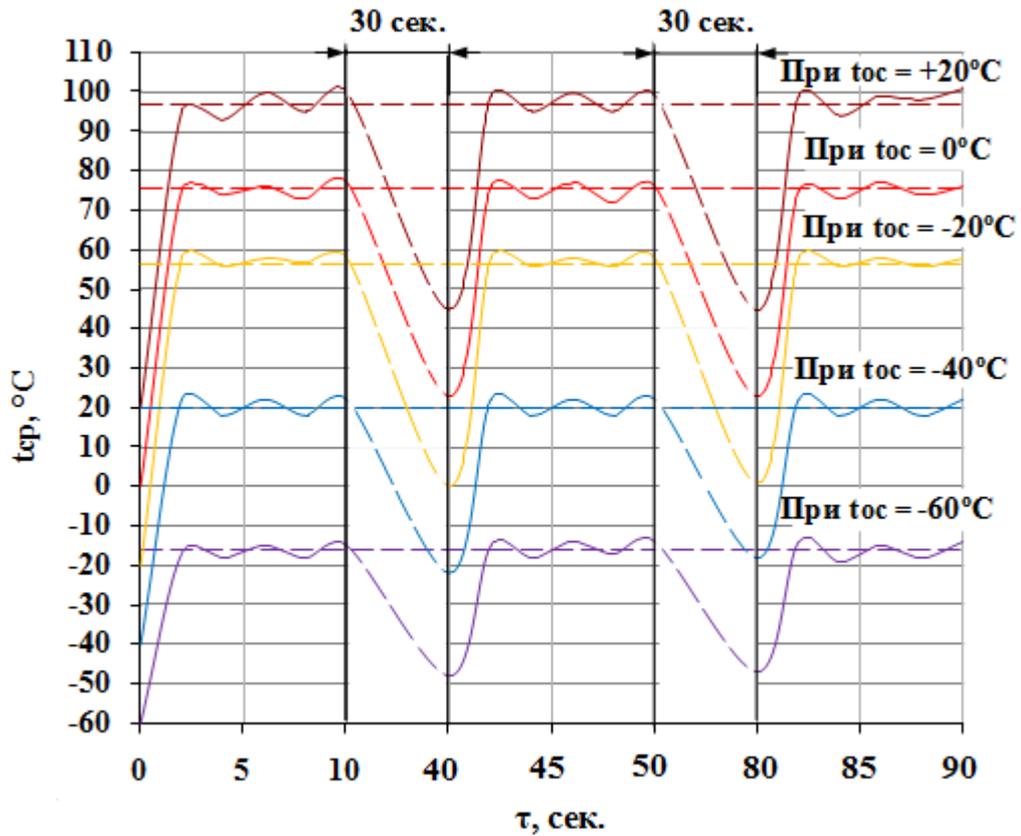


Рисунок 2.6 – Изменение средней температуры в камере сгорания дизеля при прокручивании коленчатого вала дизеля электростартером в условиях различных отрицательных температур окружающей среды

В таблице 2.3 приведены экспериментальные значения средних температур рабочего тела в камере сгорания исследуемого дизеля. На рисунке 2.7 представлена зависимость изменения средней температуры в камере сгорания от температуры окружающей среды.

Таблица 2.3

Средние значения температуры рабочего тела в камере сгорания дизеля

№ п/п	$t_{ос}, ^\circ\text{C}$	$t_{ср}, ^\circ\text{C}$
1	плюс 20	плюс 97
2	0	плюс 75,7
3	минус 20	плюс 56,5
4	минус 40	плюс 20
5	минус 60	минус 16

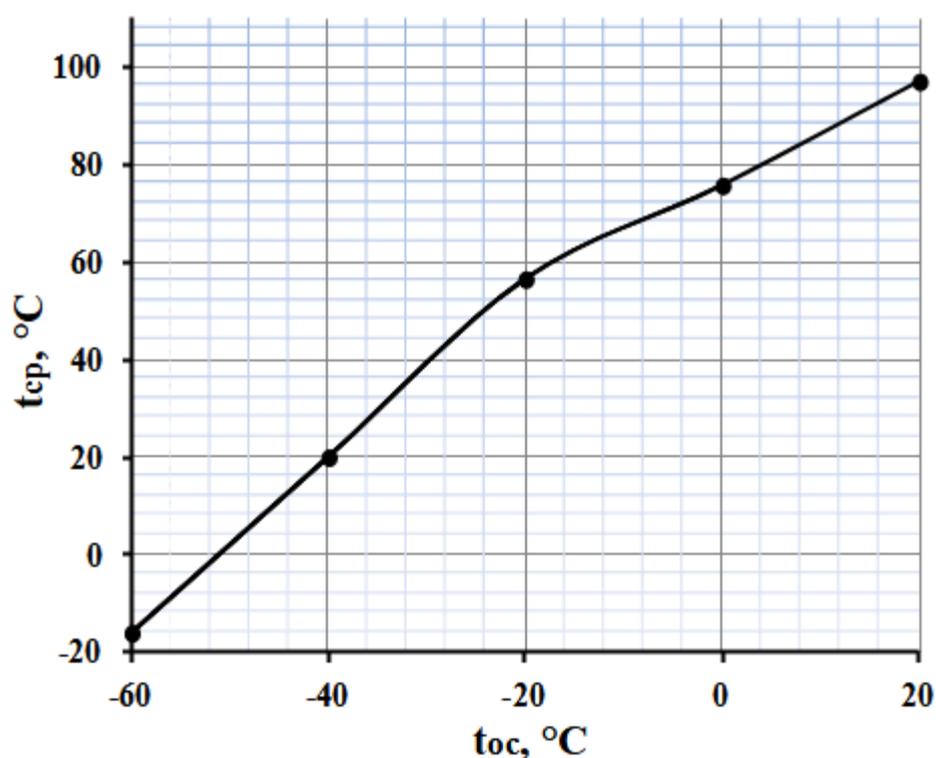


Рисунок 2.7 – Зависимость изменения средней температуры в камере сгорания дизеля от температур окружающей среды

Для определения изменения пусковой частоты дизеля, дополнительно был установлен датчик частоты вращения маховика (рисунок 2.8). Выходные контакты датчика подключали к осциллографу. В момент прокручивания дизеля электростартером осциллограф фиксировал изменение частоты входного сигнала вырабатываемого датчиком частоты вращения. Это позволило определить и проанализировать среднюю пусковую частоту $n_{ср}$ при различных температурах окружающей среды.

Методика пересчета пусковой частоты $n_{ср}$ в мин^{-1} , полученной при измерении осциллографом в Гц, представлена в приложении 10.

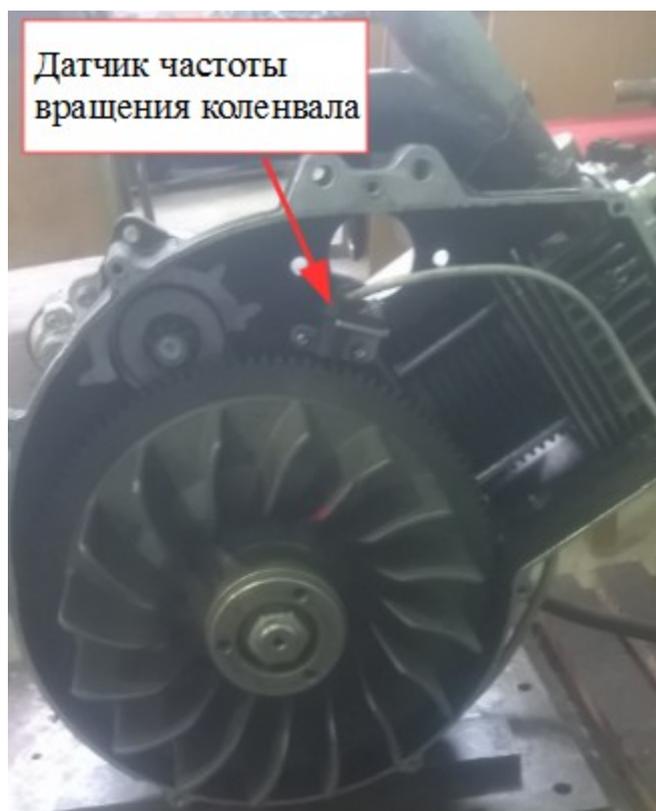
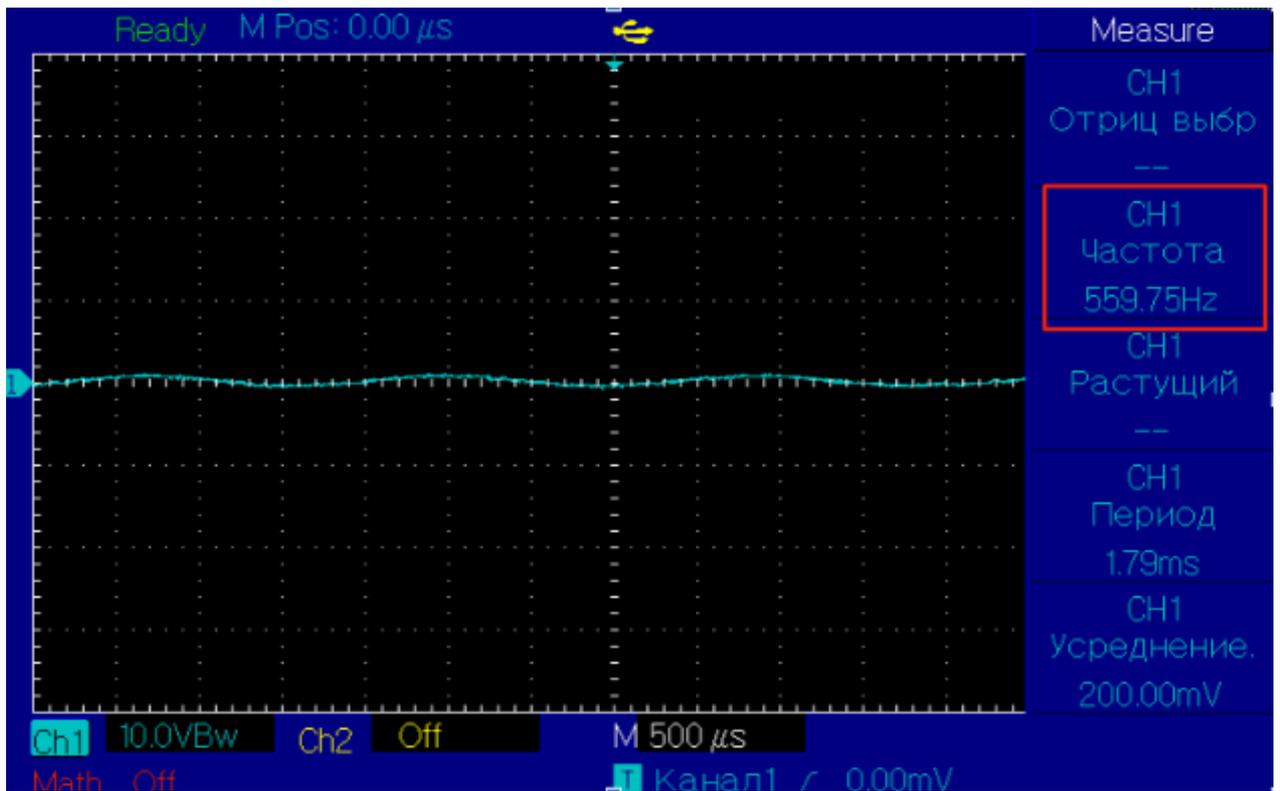
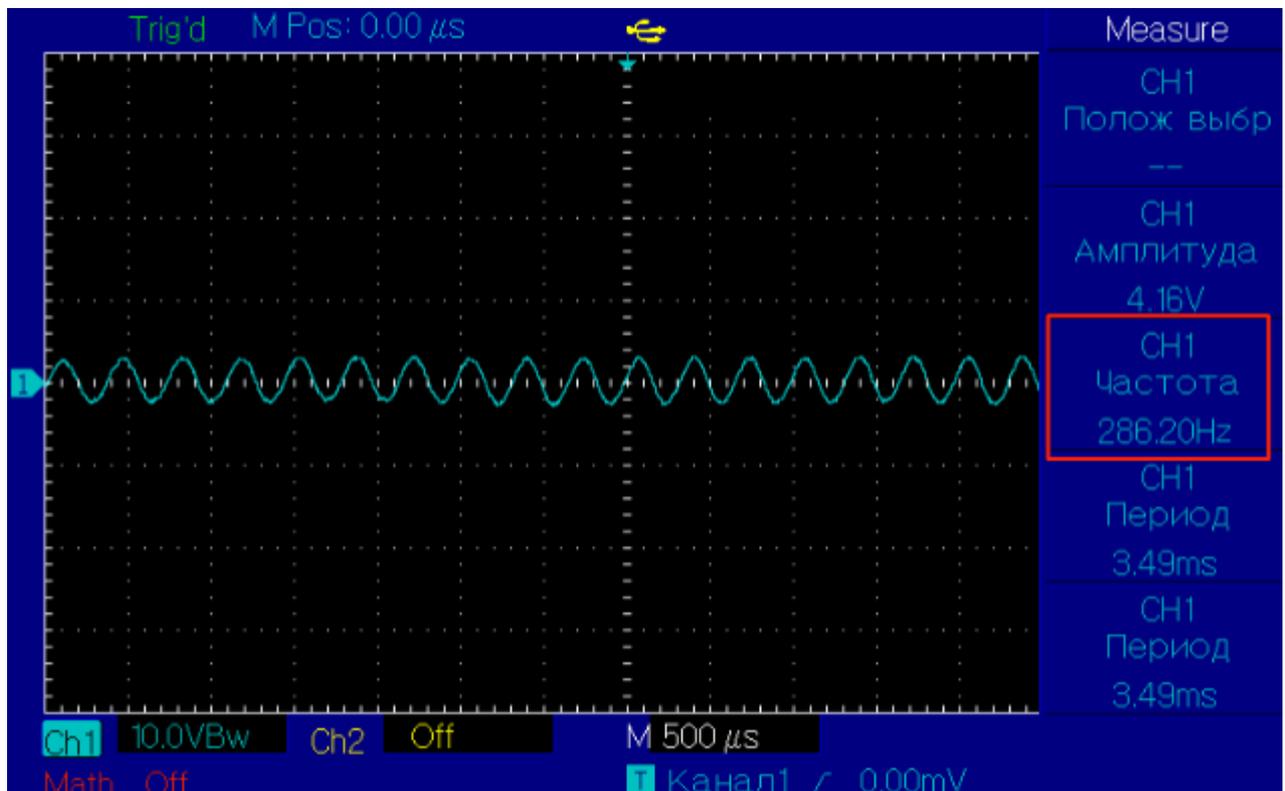


Рисунок 2.8– Расположение датчика частоты вращения

На рисунке 2.9 (а, б) показана частота вращения маховика, фиксируемая осциллографом, на режиме стартерного пуска при температурах окружающей среды плюс 20 °С и минус 60 °С соответственно. На рисунке 2.10 представлен график зависимости изменения средней пусковой частоты от температуры окружающей среды. Измерение проводилось с учетом работы подогревателя масла, расположенного в картере дизеля.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Частота вращения маховика: а) – при температуре окружающей среды плюс 20 °С; б) – при температуре окружающей среды минус 60 °С

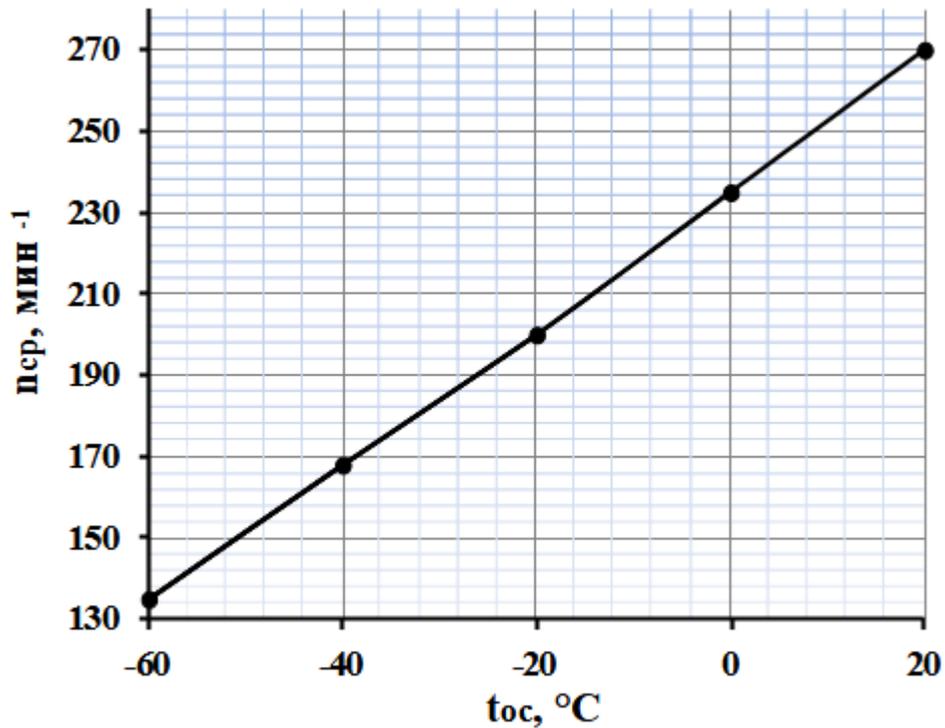


Рисунок 2.10 – Средняя пусковая частота дизеля в момент пуска дизеля

В результате эксперимента установлено:

- средняя пусковая частота дизеля на режиме прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером при температуре окружающей среды минус 60 °C составляет 130– 140 мин⁻¹.

- средняя пусковая частота дизеля на режиме прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером при температуре окружающей среды плюс 20 °C составляет 260– 270 мин⁻¹.

Таким образом пусковая частота дизеля при температуре окружающей среды минус 60 °C ниже в 2 раза пусковой частоты при температуре окружающей среды плюс 20 °C.

Полученные результаты целесообразно дополнить экспериментальными данными о возможностях пуска дизеля в диапазоне отрицательных температур до минус 60 °C с применением в качестве облегчения пуска способа предварительного разогрева впускного воздуха с последующей принудительной подачей в цилиндр дизеля. Это позволит оценить влияние прогрева впускного воздуха на тем-

пературу в цилиндре дизеля на режиме пуска и сформулировать требования к минимальному уровню температуры впускного воздуха для обеспечения гарантированного пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды.

2.7 Выводы по второй главе

1. Анализ пуска дизеля при отрицательных температурах окружающей среды показал, что наличие в конструкции дизеля штатного подогревателя масла, свечи накаливания, подогревателя топлива недостаточно для осуществления гарантированного пуска и надежной работы дизеля в условиях арктических температур окружающей среды.

2. К существующим штатным средствам облегчения пуска дизеля необходима установка дополнительного устройства, способного существенно увеличить температуру в камере сгорания для воспламенения топливо-воздушной смеси в момент такта сжатия. Тем самым повысить вероятность обеспечения гарантированного пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды.

3. Необходима доработка существующей методики пуска в условиях отрицательных температур окружающей среды, учитывающая наличие дополнительных систем облегчения пуска, а так же простоту и эффективность ее применения.

Полученные выводы с учетом результатов проведенного анализа в первой главе позволяют сформулировать гипотезу диссертационного исследования:

Гипотеза диссертационного исследования – принудительная подача в цилиндр предварительно разогретого воздушного заряда обеспечивает гарантированный и надежный пуск дизеля типа 1Ч9,5/8,0 в условиях арктических температур окружающей среды.

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА И РАБОТЫ МАЛОРАЗМЕРНОГО ДИЗЕЛЯ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

3.1. Предварительные замечания

Математическое моделирование является одним из основных методов современных научных исследований. Метод математического моделирования как инструмент исследования в современной теории поршневых двигателей занимает значительное место и способствует их быстрому развитию.

Третья глава диссертации посвящена математическому моделированию как инструменту исследования режимов пуска дизеля, а так же процессов направленных на облегчение пуска дизеля при отрицательных температурах окружающей среды.

В третьей главе предложена классификация и проведен анализ математических моделей, направленных на исследование пусковых режимов и предпусковых процессов. Здесь же разработана математическая модель предпусковой подготовки, пуска и функционирования одноцилиндрового дизеля в условиях сверхнизких температур, произведен расчет предпускового режима работы и пуска одноцилиндрового дизеля. Приведены результаты математического моделирования, иллюстрирующие возможности разработанной математической модели. Получены закономерности изменения показателей работы дизеля на стадии предпусковой подготовки и пуска при арктических температурах воздуха окружающей среды.

3.2 Разработка классификации математических моделей систем облегчения пуска и работы ПДВС

На сегодняшний день математическое моделирование в теории поршневых двигателей внутреннего сгорания является одним из основных методов научного исследования и постоянно развивается. Для доводки конструкции современных

дизелей и оценки их параметров на стадии создания новых модификаций, использование методов математического моделирования рабочих процессов является перспективным направлением [12].

При разработке математической модели необходимо использовать то математическое описание и математический аппарат, которые обеспечат решение поставленной задачи с необходимой точностью при минимально возможных потребностях в вычислительных ресурсах.

В настоящее время преимуществами математического моделирования по сравнению с классическим натурным экспериментом являются:

уменьшение материальных и временных затрат, связанных отсутствием необходимости проведения многочисленных натуральных экспериментов;

возможность моделирования гипотетических, т.е. не реализованных в ПДВС (поршневом двигателе внутреннего сгорания) процессов и систем;

возможность реализации опасных или трудно воспроизводимых в реальности режимов работы ПДВС;

возможность изменения масштаба времени;

универсальность программного обеспечения, наличие пакетов прикладных программ для проведения широкого круга работ, позволяющих рассмотреть работу систем ПДВС как в комплексе так и отдельно друг от друга;

возможности оценки взаимного влияния систем ПДВС друг на друга, а также влияния вспомогательных внешних устройств как на ПДВС в целом, так и на отдельные его системы;

возможности прогнозирования и выявления общих закономерностей при различных режимах работы ПДВС;

возможности сравнительно простого многофакторного анализа.

Многообразие систем, проявляющееся в многообразии их структурно-функциональной организации, определяет использование множества разных математических моделей (рисунок 3.1.) в зависимости от особенностей, присущих исследуемой системе.

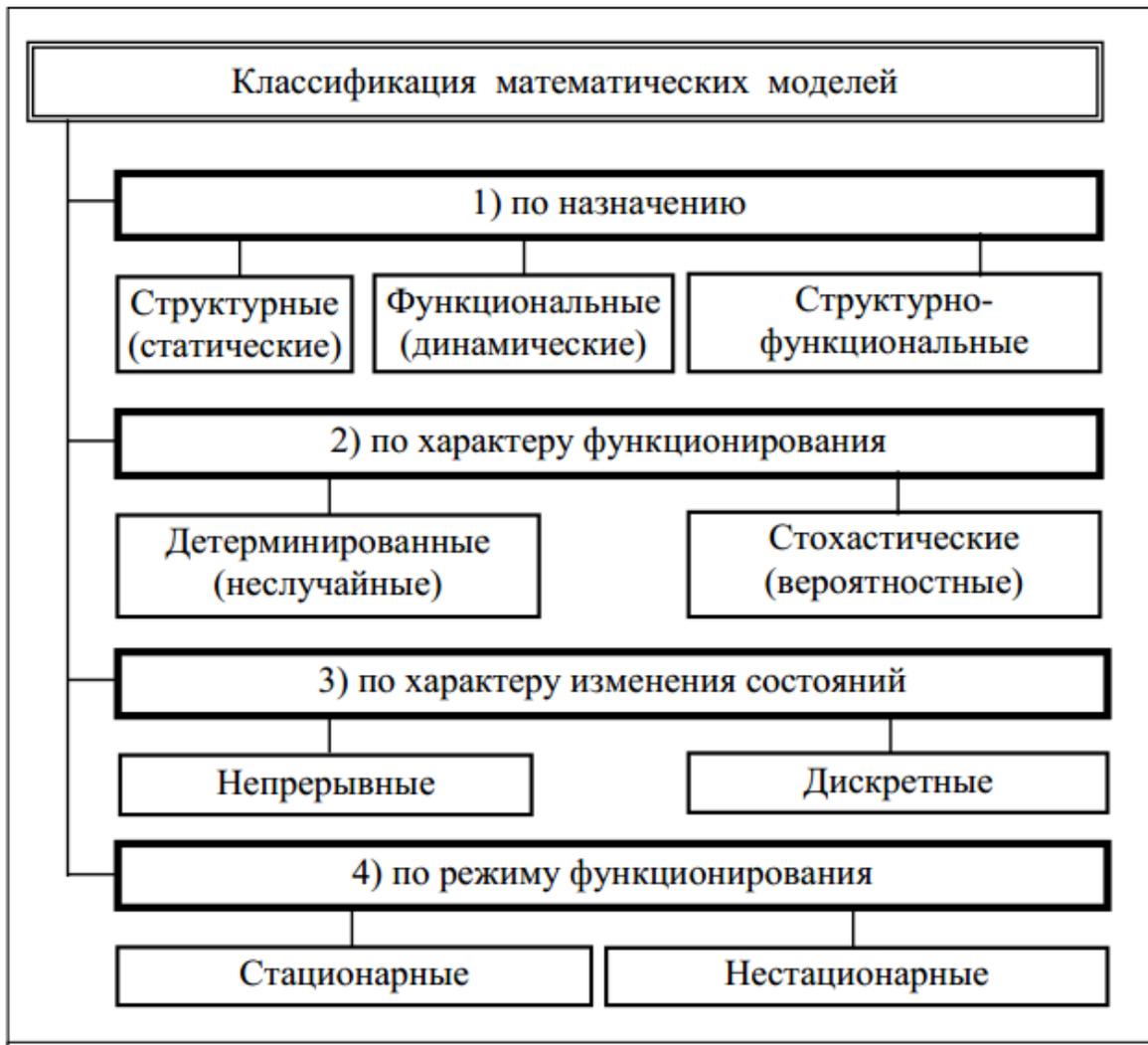


Рис. 3.1.– Классификация математических моделей [14]

По назначению различают модели:

- структурные (статические), предназначенные для отображения и исследования структурных особенностей системы;
- функциональные (динамические), предназначенные для исследования процессов функционирования системы во времени;
- структурно-функциональные, предназначенные для исследования структурно-функциональных особенностей системы.

В зависимости от характера функционирования исследуемой системы могут использоваться модели:

- детерминированные, параметры которых, а, следовательно, и характеристики, представляют собой детерминированные (четко определенные) величины;
- стохастические или вероятностные, параметры и характеристики которых представляют собой случайные величины.

В зависимости от характера протекающих в исследуемой системе процессов могут использоваться модели:

- непрерывные, отображающие непрерывные во времени процессы;
- дискретные, отображающие дискретные процессы, изменяющие свое состояние скачкообразно в дискретные моменты времени.

В зависимости от режима функционирования системы могут использоваться:

- стационарные модели, в которых характеристики функционирования, называемые стационарными, инвариантны (неизменные) во времени;
- нестационарные модели, отображающие изменение характеристик функционирования со временем.

В соответствии с вышеприведенной классификацией наиболее перспективными являются функциональные (динамические) и структурно-функциональные, детерминированные, непрерывные нестационарные математические модели.

На основании обзора публикаций [53, 26, 27, 47, 48, 72, 69, 52, 49, 51, 33, 34, 20, 14, 16, 15, 35, 36, 59, 70, 28, 60, 37, 10, 24, 43, 29, 111, 105, 106, 107, 115] по математическому моделированию систем облегчения пуска и работы ПДВС, разработана классификация математических моделей (таблица 3.1) базирующаяся на методе морфологического анализа.

Исходя из принципа математического описания систем облегчения пуска, можно выделить теоретические модели, эмпирические, смешанного типа.

Учитывая динамику процесса функционирования систем облегчения пуска и ПДВС «в целом» можно выделить три группы моделей: динамические, квазидинамические и статические.

Таблица 3.1

Классификация математических моделей систем облегчения пуска

№ п/п	Признаки	Типы математических моделей		
1	Исходный принцип математического описания	1.1. Теоретические	1.2. Эмперические	1.3. Смешанного типа
2	Учет динамики процесса функционирования	2.1. Динамические	2.2. Квазидинамические	2.3. Статические
3	В зависимости от степени пространственной детализации	3.1. Нульмерные модели	3.2. Одномерные модели	3.3.3. Двумерные и трехмерные модели
4	Описываемое моделью физическое явление	4.1. Модели СВЧ нагрева	4.2.1. Модели теплопроводность 4.2.2 Модели конвекции (испарения) 4.3.3 Модели излучения	4.3. Модели комплексных физических явлений
5	Уровень функционального описания систем облегчения пуска	5.1. Модели рабочего процесса прогрева подогреваемой системы	5.2. Модели функционирования нагревательного элемента	5.3. Модели комплексного разогрева ПДВС
6	Назначение математического описания	6.1. Модели обеспечивающие достижение требуемых (в соответствии с ТЗ) показателей	6.2.1. Модели для оценки негативных последствий работы ПДВС при использовании применяемой системы 6.2.2. Напряженно-деформированное и тепловое состояние деталей систем облегчения пуска и деталей ПДВС 6.2.3. Оценка тепловых потерь систем облегчения пуска	

В динамических моделях рассматривается работа системы облегчения пуска во времени. Квазидинамические модели – это модели, в которых временной интервал действия модели разбивается на периоды, для каждого из которых строится статическая модель. Таким образом, квазидинамические модели можно рассматривать как совокупность меняющихся и взаимосвязанных статических моделей. Статические модели – модели постоянные во времени.

В зависимости от степени пространственной детализации (по числу пространственных координат) рассматриваемые модели можно разделить на следующие группы:

- нульмерные – позволяют выполнить расчет системы в сосредоточенных параметрах и широко применяются для описания термодинамических процессов в полостях ПДВС.
- одномерные, отражают изменение свойств рассматриваемой системы в направлении одной пространственной координаты.
- двух и трехмерные, наиболее полно описывают процессы, происходящие внутри отдельных частей системы. Обеспечивая высокую степень детализации, эти модели позволяют определять значения параметров в любой точке расчетной области и в любой момент времени, объяснить состояние рассматриваемой системы. Недостатком таких моделей является сложность в задании исходных данных, а так же большие вычислительные ресурсы.

С точки зрения описываемого моделью физического явления:

- модели СВЧ нагрева – модели рассматриваемые нагрев электромагнитными волнами;
- модели теории теплообмена (теплопроводность, конвекция, излучение);
- модели смешанного типа могут рассматривать несколько физических явлений возникающих в объекте исследования.

По уровню функционального описания можно выделить:

модели рабочего процесса прогрева подогреваемой системы (системы впуска, системы охлаждения, системы смазки). Такие модели описывают физические

процессы, связанные с передачей и распространением теплоты в подогреваемой системе;

модели функционирования нагревательного элемента. С помощью таких моделей исследуются физические процессы только применительно к нагревательному элементу;

модели комплексного разогрева ПДВС или смешанного типа. Одновременно рассматривают работу нагревательного элемента и прогрев подогреваемой системы. Могут использоваться при описании прогрева всего ПДВС во внешней среде, а так же учитывают прогрев отдельных систем ПДВС в совокупности друг с другом их взаимное влияние.

В настоящее время математические модели являются основой проблемно-ориентированных программных комплексов CAE (Computer–Aided Engineering – интегрированные программные средства моделирования функционирования проектируемого объекта или системы инженерного анализа). CAE-системы позволяют оценить, как поведёт себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации, помогают убедиться в работоспособности изделия, без привлечения больших затрат времени и средств. Расчётная часть таких пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений (метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод конечных разностей и др.).

Современные системы инженерного анализа (или системы автоматизации инженерных расчётов) CAE применяются совместно с CAD и CAM системами (зачастую интегрируются в них, в этом случае получают гибридные CAD/CAE/CAM-системы).

К наиболее распространённым отечественным CAE системам относятся: LVMFlow, QForm, APM WinMachine, Fidesys, АСОНИКА, FlowVision, EULER, ФРУНД, ИСПА и др.

К наиболее распространённым зарубежным CAE системам относятся: ANSYS/Multiphysics, AI*NASTRAN, MSC.NASTRAN, MSC SimEnterprise, Pro/

MECHANICA, Unigraphics NX CAE, Extensive Digital Validation (CAE), Catia CAE, COSMOS/Works, COSMOS/Motion и др.

Перечисленные модели используются для достижения требуемых (в соответствии с ТЗ) мощностных, экономических, массогабаритных показателей, показателей надежности и долговечности, а так же для оценки негативных последствий работы ПДВС (оценка напряженно–деформированного и теплового состояния деталей системы облегчения пуска и деталей ПДВС, оценка тепловых потерь систем облегчения пуска и др.).

3.3. Анализ математических моделей процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля

Основные математические модели, применяемые в настоящее время, с учетом разработанной и рассмотренной ранее классификации (таблице 3.1) приведены в таблице 3.2.

Из представленных в таблице 3.2 работ, особый интерес представляет работа В.Ф. Боровикова, [6] в которой разработана методика возможной оценки пуска тракторного дизеля, реализованная в пакете программ для ЭВМ. Применение данного программного обеспечения позволяет прогнозировать зону уверенного пуска дизеля как с применением подогрева впускного воздуха и без применения средств облегчения пуска, а так же эффективность применяемого подогревателя впускного воздуха. Стоит отметить, что при разработке программного обеспечения в математической модели термодинамического расчета процесса сжатия учитывается изменение мгновенной частоты прокручивания коленчатого вала от угла поворота коленчатого вала дизеля, что очень важно для определения оценки возможности возникновения первой вспышки при пусковом прокручивании дизеля.

Таблица 3.2

Математические модели процессов предпусковой подготовки и пуска ПДВС

№	Авторы	Характеристика математических моделей	Тип модели (табл. 3.2.1)	Основные принятые допущения
1	В.В. Харитонов [66]	Моделирование разгона после пуска дизеля .	1.2; 2.1; 3.2; 5.1; 6.1	Эффективный крутящий момент и частота вращения вала определяются путем аппроксимирования ВСХ дизеля.
2	В.Ф. Боровиков [6]	Моделирование процесса сжатия воздушного заряда на пусковых режимах.	1.3; 2.3; 3.1; 4.2; 5.1; 6.2	Утечка воздуха в сопряжении поршень-цилиндр считается как утечка из объема с постоянным давлением равным среднему давлению на конкретный период; изменение мгновенной частоты вращения коленчатого вала задается экспериментальной зависимостью от угла поворота; расход воздуха определяется экспериментально; неравномерность вращения коленчатого вала рассматривается как дискретные угловые перемещения за отрезки времени.
3	Г.М. Крохта [31]	Моделирование послепускового прогрева дизель-трансмиссионной установки в условиях отрицательных температур окружающей среды	1.3; 2.2; 3.2; 4.2; 5.3; 6.1; 6.2	Эксергетический баланс моторно-трансмиссионной установки с окружающей средой рассматривается в квазидинамической постановке; коэффициент конвективной теплоотдачи принимается средним по поверхности.

4	Л.А. Новопашин [48] Л.В. Денешко П.В. Кочетков	Расчет теплового баланса при термодинамическом процессе сжатия в цилиндре двигателя при пуске	1.1; 2.3; 3.2; 4.2; 5.1; 6.1; 6.2	Рабочее тело – идеальный газ, тепловой баланс сжатия в цилиндре рассматривается в упрощенной статической, (стационарной, термодинамической) постановке.
5	В.В. Шишков [72]	Моделирование внутрицилиндровых процессов при пуске дизеля с учетом прогрева воздуха на впуске отработавшими газами.	1.3; 2.1; 3.1; 4.2; 5.1; 6.1; 6.2	Рабочее тело – идеальный газ; изменение состояния рабочего тела в цилиндре рассматривается в нульмерной постановке; момент, передаваемый на коленчатый вал от пускового двигателя задается массивом данных; момент сопротивления определяется по опытным данным.
6	А.В. Шавлов [69]	Комплексное математическое моделирование процессов предпусковой подготовки дизеля типа В-2 с системой термостатирования масла.	1.3; 2.1; 3.2; 4.2 5.1; 6.1	Условная средняя температура двигателя, определяется как среднее арифметическое температур головки цилиндра, подшипников коленчатого и распределительного валов;
7	А.И. Овчинников [52] А.Г. Белых Ю.Е. Грядунова и др.	Моделирование процесса подогрева масла в ПДВС потоком воздуха через патрубок конечного радиуса	1.3; 2.1; 3.2; 4.2; 5.1; 6.1	Объем картера ПДВС представлен эквивалентным параллелепипедом; плотность теплового потока постоянна; тепловой поток через свободную поверхность масла в картере равен нулю; теплофизические характеристики моторного масла постоянны; конвективный и теплообмен излучением не учитываются.

8	А.В. Никитин [49] А.А. Савочкин	Моделирование процесса подогрева моторного масла в поддоне картера ПДВС гибкими нагревательными элементами.	1.3; 2.2; 3.2; 4.2; 5.1; 6.1	Тепловой баланс системы смазки рассматривается в квазидинамической постановке; теплофизические характеристики моторного масла постоянны.
9	В.Н. Бондарь [9]	Моделирование рабочего процесса дизеля на режимах пуска.	1.3; 2.1; 3.1; 4.2; 5.1; 6.1; 6.2	Рабочее тело – идеальный газ; изменение состояния рабочего тела в цилиндре рассматривается в нульмерной постановке; температура стенки постоянна; угловая скорость коленчатого вала в цикле постоянна.
10	А.А. Козлов [34]	Исследование влияния температуры свежего заряда на пусковые характеристики дизелей типа В-2 в условиях низких температур.	1.3; 2.3; 3.1; 4.2; 5.1; 6.2	Частота вращения коленчатого вала постоянна, температура топлива постоянна; рабочее тело – идеальный газ; состояние рабочего тела в цилиндре рассматривается в нульмерной постановке
11	Р.Ф. Калимуллин [28]	Оценка эффективности систем предпускового подогрева автомобильного двигателя.	1.2; 2.1; 3.2; 6.2	Аппроксимирующие зависимости модели построены по результатам экспериментальных исследований.
12	В.А. Раков [60] А.В. Сальников	Моделирование системы охлаждения ПДВС, устройства прогрева двигателя и отопителя салона автомобиля.	1.3; 2.2; 3.2; 4.2; 5.1; 5.3; 6.1	Тепловой баланс систем рассматривается с в квазидинамической постановке; доля теплоты сгорания топливовоздушной смеси, отводимая в систему охлаждения считается постоянной.

13	Н.В. Клиначев [37] С.Г. Воронин А.И. Согрин и др.	Математическая модель комплекса стартер-генератор, отражающая переходные процессы пуска дизеля при использовании электромеханического преобразователя в виде вентильного двигателя и свинцовой АКБ.	1.3; 2.1; 3.2; 6.1; 3.2; 6.1	Идеальный источник ЭДС (линейное увеличение ЭДС); инерционность пускового двигателя не учитывается; форма изменения компрессионного момента принята синусоидальной
14	В.Н. Бондарь [10] А.А. Малоземов В.С. Кукис	Моделирование рабочего процесса дизеля и отдельных подсистем на режимах пуска	1.3; 2.1; 3.1; 3.2; 5.1; 6.1; 6.2	Рабочее тело – идеальный газ, изменение состояния рабочего тела рассматривается в нульмерной и одномерной постановке.
15	Б.В.Журавский [24] А.В. Занин И.Н. Квасов	Моделирование электростартерной системы пуска ПДВС с учетом предпускового разряда АКБ	1,3; 2,1; 3,2; 5.1; 6.1; 6.2	Использование в расчетах среднего момента сопротивления и средней частоты вращения коленчатого вала;

16	Ш.М. Мерданов [43] С.А. Эртман Г.Н. Токарева и др.	Математическое моделирование и исследование влияния низких температур окружающего воздуха и скорости ветра на температурный режим ПДВС	1.1; 2.3; 3.2; 4.2; 5.1; 5.3; 6.1	Процесс прогрева описывается с помощью уравнения теплового баланса в статической, (стационарной, термодинамической) постановке.
17	В.Ф. Калинин [29] А.В. Щегальков	Моделирование совместных режимов работы средств терморегулирования топлива и питающего воздуха в дизельных двигателях.	1.3; 2.1; 3.1; 3.2; 4.2; 5.1; 6.1	Рабочее тело – идеальный газ; изменение состояния топлива в системе топливоподачи рассматривается в нульмерной и одномерной постановке.

К смешанному типу моделей можно отнести математическое описание индукционного подогревателя воздушного заряда во впускном коллекторе дизелей типа В-2, представленное в работе [72]. В основу математического описания положено уравнение на основании регрессионного анализа экспериментальных данных В.В. Шишкова, также используются стандартные расчетно-теоретические и экспериментальные методы, основанные на известных и широко апробированных зависимостях теории поршневых ПДВС, газовой динамики и термодинамики, которые были уточнены с учетом особенностей пуска дизеля. В результате проведенных исследований выявлена зависимость влияния температуры свежего заряда на продолжительность пуска дизеля. В ходе исследования получено, что рациональным значением является температура свежего заряда 336 К (при температуре окружающего воздуха 248 К). При температуре свежего заряда ниже 260 К продолжительность пуска значительно увеличивается, так как температура в конце такта сжатия недостаточная для надежного воспламенения (в первые циклы работы).

Так же интерес представляет работа по подогреву масла в картере двигателя [52]. Здесь проведен анализ теплового состояния масла в картере двигателя в период разогрева. Построена математическая модель подогрева масла нагретым потоком воздуха через патрубок конечного радиуса для любого типа двигателя внутреннего сгорания. Данная модель определяет уравнение энергии, характеризующееся линейной зависимостью температуры масла от температуры окружающего воздуха и времени подогрева

В работе Никитина А.В., Савочкина А.А. [49] в качестве материала нагревательного элемента применен новый материал лавсан. Представлена математическая модель, составленная на основе уравнения теплового баланса, которая описывает работу подогревателя масла в картере двигателя с непрерывным поддержанием температуры по средствам электрических матов изготовленных из лавсановых нитей с резистивным напылением серебра. Модель позволяет определять конструктивные и режимные параметры подогревателя.

В работе [9] представлена математическая модель рабочего процесса дизеля

на режимах пуска. Модель составлена на основе дифференциальных уравнений массового и энергетического баланса рабочего тела и уравнения состояния. В представленной модели показатель политропы сжатия и утечку заряда через поршневые кольца предлагается считать по методике В.Л. Купершмидта. Для более точного определения величины утечки заряда автор использует формулу К. Энглиша. Потери тепла зарядом в процессе сжатия определяются формулой Ньютона. Для определения коэффициента теплоотдачи используется выражение Вошни. Полученная модель является динамической, полностью замкнутой и позволяет рассчитывать нестационарные режимы и процессы. Так же в работе представлены результаты расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм, подтверждающих адекватность предложенной математической модели.

Анализ работ показал, что при разработке математического описания средств пусковой подготовки, устройств облегчения пуска, моделирования процесса прогрева ПДВС и его систем наиболее широко используются следующие допущения:

- процесс прогрева описывается с помощью уравнения теплового баланса;
- температура стенки постоянна (адиабатная стенка);
- рабочее тело – идеальный газ;
- состояние рабочего тела рассматривается в нульмерной и одномерной постановке;
- аппроксимирующие зависимости модели построены по результатам экспериментальных исследований;
- условная средняя температура двигателя, определяется как среднее арифметическое температур головки цилиндра, подшипников коленчатого и распределительного валов.
- неравномерность вращения коленчатого вала рассматривается как дискретные угловые перемещения за отрезки времени.

На основании проведенного анализа можно отметить следующее:

- наиболее перспективными являются структурно-функциональные модели теории теплообмена смешанного типа, позволяющие рассмотреть процес-

сы, происходящие в ПДВС, его системах и вспомогательных устройствах как на микро, так и на макроуровне;

- отсутствуют модели описывающей подогрев воздуха на впуске и пуск малолитражного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур;
- недостаточно уделяется внимания вопросам динамики ПДВС как в целом, так и отдельных его систем на стадии предпусковой подготовки и пуска в условиях отрицательных температур окружающего воздуха.

3.4 Разработка математической модели предпусковой подготовки, пуска и функционирования дизеля

Математическая модель предпусковой подготовки, пуска и функционирования дизеля базируется на тепломеханике (термодинамике открытых систем) [1, 39, 21, 65, 103] и отражает основные особенности двигателя как системы преобразующей энергию во времени. Разработанная математическая модель является дальнейшим развитием научного направления «Динамическая теория ДВС» [1, 39, 21, 65, 103] истоки которого были заложены в трудах М.А. Мамонтова и Б.М. Подчуфарова. Данное направление на протяжении последних 30 лет развивается на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» Тульского государственного университета и включает математическое [1, 39, 21, 65, 103] и программное обеспечение [40, 102] для исследования и расчета двигателей внутреннего сгорания различных типов на нестационарных режимах.

Для рассматриваемого одноцилиндрового дизеля 1Ч9,5/8,0 система уравнений математической модели, основывается на законах сохранения энергии, массы, уравнениях движения твердых звеньев и включает 7 дифференциальных уравнений (Там же стр.15).

При построении математической модели были приняты следующие допущения [65]:

- рабочее тело – идеальный газ;

- состояние рабочего тела в рабочей полости квазиравновесное;
- процесс подачи топлива в камеру сгорания, а так же смесеобразование происходит практически мгновенно;
- температура впрыскиваемого в камеру сгорания топлива не учитывается;
- процесс горения заменяется подводом эквивалентного количества энергии в форме тепла по закону Вибе;
- течение через проходное течение впускного и выпускного клапанов рассматривается как квазистационарное;
- воздействием волновых явлений на параметры потока во впускном и выпускном трубопроводах пренебрегаем;
- клапанная система безинерционна;
- моментом инерции распределительного вала пренебрегаем в связи с его малостью, относительно момента инерции коленчатого вала;
- в математической модели условием воспламенения топлива являлось достижение температуры заряда равной 300 °С [17].

Дифференциальные уравнения скоростей изменения плотности и температуры рабочего тела в цилиндре с учетом утечек через зазоры в ЦПГ имеют вид:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \frac{1}{W} \cdot [G_{n1} + G_{n2} + G_{n3} - G_{p1} - G_{p2} - G_{p3} - \rho \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2] \quad (3.1)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{c_v \cdot \rho \cdot W} \cdot \left[\begin{array}{l} G_{n1} \cdot (i_{n1} - u) + G_{n2} \cdot (i_{n2} - u) + G_{n3} \cdot (i_k - u) - \\ -(G_{p1} + G_{p2} + G_{p3}) \cdot (i - u) + \dot{Q}_g + \dot{Q}_e - \dot{Q}_t - p \cdot f_n \cdot \omega \cdot a_2 \end{array} \right] \quad (3.2)$$

Для описания изменения состояния газа в картере ПДВС, который моделировался как полость переменного объема W_k , использовались аналогичные дифференциальные уравнения:

$$\frac{d\rho_k}{d\tau} = \frac{1}{W_k} \cdot [G_{p3} - G_{n3} + G_{n4} - G_{p4}] \quad (3.3)$$

$$\frac{dT_k}{d\tau} = \frac{1}{c_{vk} \cdot \rho_k \cdot W_k} [G_{p3} \cdot (i - u_k) + G_{n3} \cdot (i_k - u_k) + G_{n4} \cdot (i_{n1} - u_k) - G_{p4} \cdot (i_k - u_k)] \quad (3.4)$$

Угловая скорость и угол поворота коленчатого вала двигателя определялись из уравнений:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{J} \cdot (M_d + M_n - M_c) \quad (3.5)$$

$$\frac{d\phi}{d\tau} = \omega \quad (3.6)$$

Температура стенки объема цилиндра:

$$\frac{dT_{ст}}{d\tau} = \frac{1}{c_{cm} \cdot m_{cm}} (\dot{Q}_t - \dot{Q}_n) \quad (3.7)$$

В уравнениях (3.1) – (3.6) использовались следующие условные обозначения: τ – время; T, ρ – температура и плотность рабочего тела в цилиндре; T_k, ρ_k – температура и плотность рабочего тела в картере; c_v, c_{vk} – удельная изохорная теплоемкость рабочего тела в цилиндре и картере соответственно; W, W_k – текущий объем рабочего тела в цилиндре и картере; f_n – площадь поршня; ω и ϕ – угловая скорость и угол поворота коленчатого вала; $G_{n1}, G_{n2}, G_{n3}, G_{n4}$ – секундный массовый приход рабочего тела через впускной, выпускной клапаны, зазоры в ЦПГ и систему вентиляции картера, соответственно; $G_{p1}, G_{p2}, G_{p3}, G_{p4}$ – секундный массовый расход рабочего тела через впускной, выпускной клапаны, зазоры в ЦПГ и системе вентиляции картера, соответственно; u, i – удельная внутренняя энергия и энтальпия рабочего тела в цилиндре; u_k, i_k – удельная внутренняя энергия и энтальпия рабочего тела в картере; \dot{Q}_g – секундный приход энергии в форме теплоты при включении свечи накаливания; \dot{Q}_g – секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси; \dot{Q}_t – секундный расход энергии в форме теплоты в результате теплообмена в цилиндре; \dot{Q}_n – теплообмен через стенку; J – момент инерции; M_d – движущий момент; M_n – пусковой момент; M_c – момент сопротивления.

Движущий момент в уравнении (3.5), для рассматриваемого одноцилиндрового дизеля определяется следующим образом:

$$M_d = a_4 \cdot \left[(p - p_0) \cdot f_n - a_3 \cdot m_n \cdot \omega^2 - a_2 \cdot m_n \cdot \frac{d\omega}{dt} \right],$$

где p – давление рабочего тела в цилиндре; p_0 – давление рабочего тела под поршнем; m_n – приведенная масса частей двигателя, совершающих возвратно-поступательное движение.

$$a_2 = r_k \cdot \left(\sin \phi + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2\phi \right); \quad a_3 = r_k \cdot (\cos \phi + \lambda \cdot \cos 2\phi); \quad a_4 = r_k \cdot \sin \phi \cdot \left[1 + \frac{\lambda \cdot \cos \phi}{1 - \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos 2\phi)} \right]; \quad \lambda = \frac{r_k}{l_{sh}},$$

где r_k – радиус кривошипа; l_{sh} – длина шатуна.

Для определения момента сопротивления M_c двигателя на режиме пусковой частоты использовалась эмпирическая зависимость [21]:

$$M_c = 0,875 \cdot V_h \cdot \left(0,11 + 0,022 \cdot \frac{n}{100} \right) \cdot \gamma^{0,39} \quad (3.8)$$

где n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; V_h – рабочий объем двигателя; γ – кинематическая вязкость жидкости, сСт.

Значения кинематической вязкости γ жидкости определялись экспериментальным путем и приведены в приложении 11.

Результаты расчета момента сопротивления M_c для исследуемого дизеля приведены на рисунке 3.2.

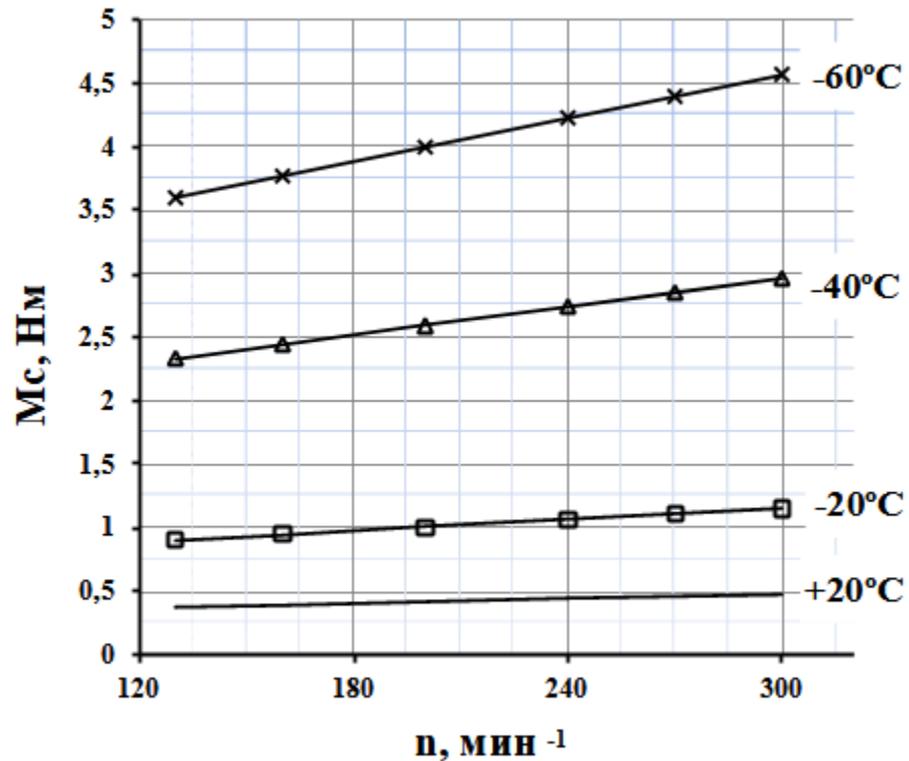


Рисунок 3.2 – Изменение момента сопротивления M_c при различных температурах окружающей среды

Для расчета пускового момента M_{II} использовались технические характеристики стартера представленные в Приложении 9.

Конвективный теплообмен в цилиндре описывался уравнением Ньютона [51]:

$$\dot{Q}_t = \alpha_m \cdot f_{cm} \cdot (T - T_{cm}) ;$$

где f_{cm} – площадь поверхности теплообмена; α_m – коэффициент конвективного теплообмена α_m вычислялся по формуле Эйхельберга:

$$\alpha_m = 7,8 \sqrt[3]{c_m} \sqrt{pT} ;$$

Теплообмен через стенку вычислялся по уравнению

$$\dot{Q}_n = \alpha_n \cdot f_n \cdot (T_{cm} - T_0) ;$$

где f_n – площадь поверхности стенки; T_0 – температура наружной стенки. На стадии пуска температура T_0 принималась равной температуре окружающей среды.

Для расчета коэффициента теплоотдачи между рабочим телом и стенками двигателя α_n , использовалась формула [41].

$$\alpha_n = 2,1 \cdot \sqrt{p \cdot T} \cdot c_m^{0,333}$$

где c_m – средняя скорость поршня.

Секундный приход энергии в форме теплоты при горении рабочей смеси вычислялся по методике, приведенной в работе [2].

Секундный расход КГ или утечки через зазоры в ЦПГ определяется следующим образом [58]:

$$G = \mu \cdot f \cdot \psi \cdot \sqrt{p_{вх} \rho_{вх}}$$

где μ – безразмерный коэффициент расхода при течении среды; f – площадь сечения, через которое осуществляется течение. $p_{вх}$ и $\rho_{вх}$ – соответственно давление и плотность газа в полости из которой происходит истечение; ψ – функция, зависящая от режима истечения:

$$\psi = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{2/(k-1)}} \quad \text{при} \quad \frac{p_{вых}}{p_{вх}} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} ;$$

$$\psi = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)^{(k+1)/k} \right]} \quad \text{при} \quad \frac{p_{вых}}{p_{вх}} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}$$

Эффективная площадь проходного сечения кольца μf , мм² рассчитывается по эмпирической формуле [44]:

$$\mu f = (0,046 + 0,034 \cdot i_H) \cdot D_{ц} - (3,319 + 2,394 \cdot i_H) \quad (3.9)$$

где i_H – степень износа поршневых колец: 0 – для новых, 1 – для предельно изношенных; $D_{ц}$ – диаметр цилиндра, мм².

Приведенные зависимости (3.1) – (3.7) дополнялись уравнением состояния идеального газа, а также известными зависимостями [65] для определения G_n , G_p , u , i .

Приведенная система уравнений (3.1) – (3.7) может использоваться для моделирования работы ПДВС как на режиме предпусковой подготовки с последую-

щим пуском, так и во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя.

При реализации модели на ЭВМ были введены и приняты значения конструктивных параметров дизеля, характеристик рабочего тела и показателей рабочих процессов представленные в приложения 12.

На рис. 3.3 – 3.5 приведены результаты расчета работы дизеля 1Ч9,5/8,0 при температуре окружающей среды t_{oc} минус 60 °С, на режиме пуска без подачи топлива. Значение температуры впускного воздуха соответствует температуре окружающей среды.

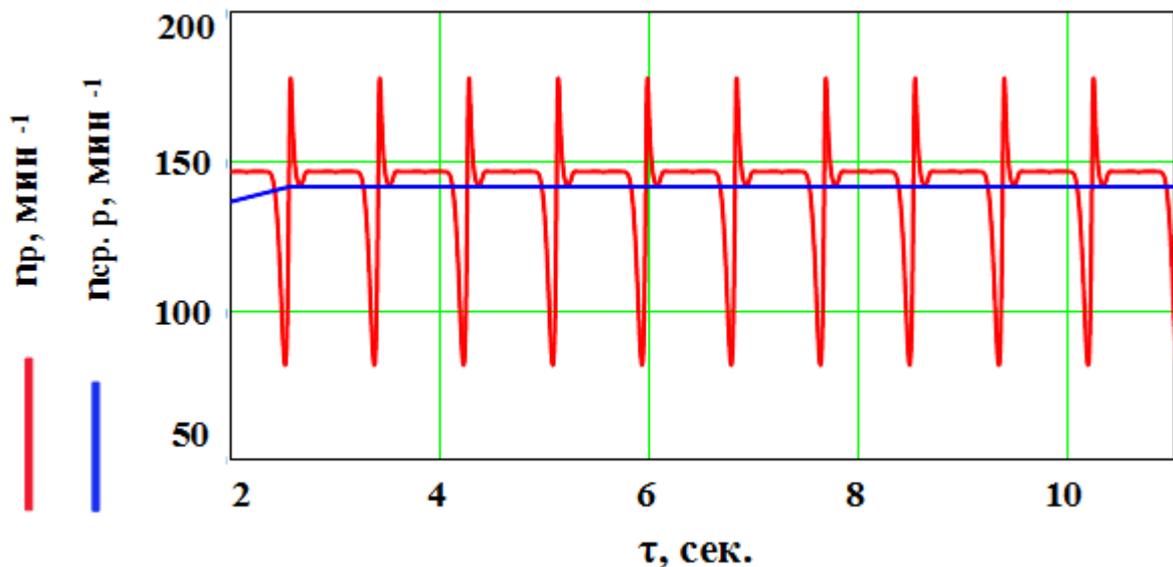


Рисунок 3.3 – Изменение пусковой частоты вращения коленчатого вала дизеля

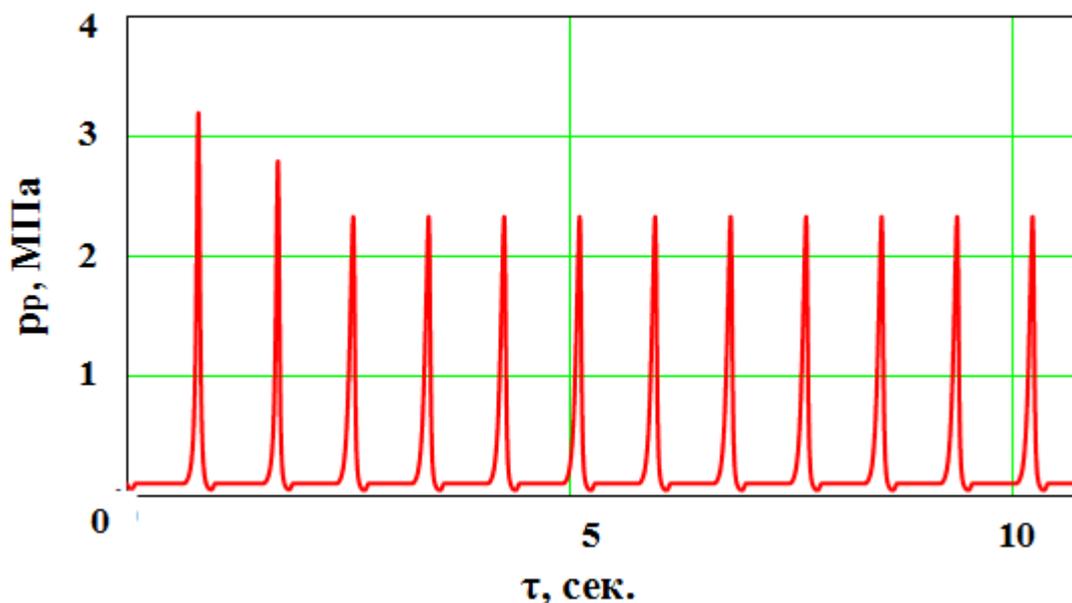


Рисунок 3.4 – Изменение давления в цилиндре дизеля

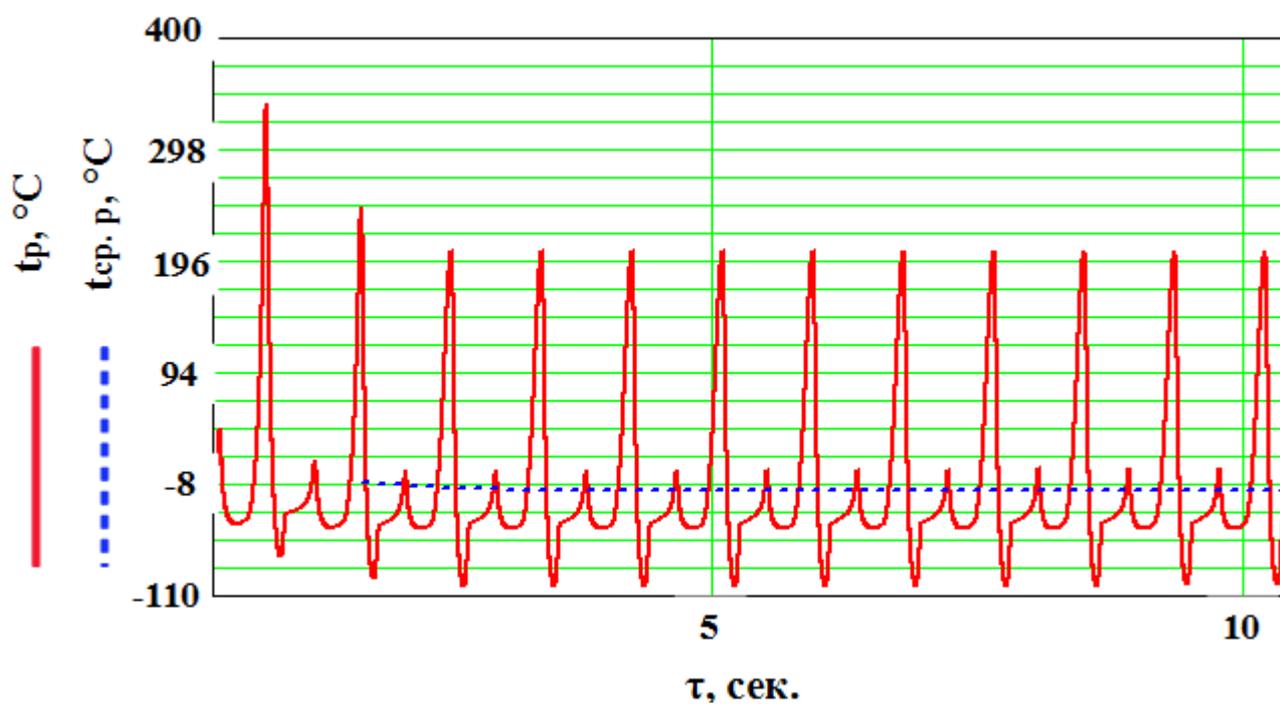


Рисунок 3.5 – Изменение температуры в цилиндре дизеля

Сравнение результатов моделирования осуществлялось с результатами эксперимента в климатической камере.

На рисунках 3.6 – 3.8 приведены изменения расчетных и экспериментальных значений средних температур рабочего тела в камере сгорания и средней пусковой частоты в зависимости от температуры окружающей среды, а так же изме-

нение пусковой частоты в цикле дизеля 1С9,5/8,0 при температуре окружающей среды минус 60 °С, полученные в ходе эксперимента в климатической камере КТВВ 8000 отдела «Надежности» АО «АК «Туламашзавод» (п. 2.6.2).

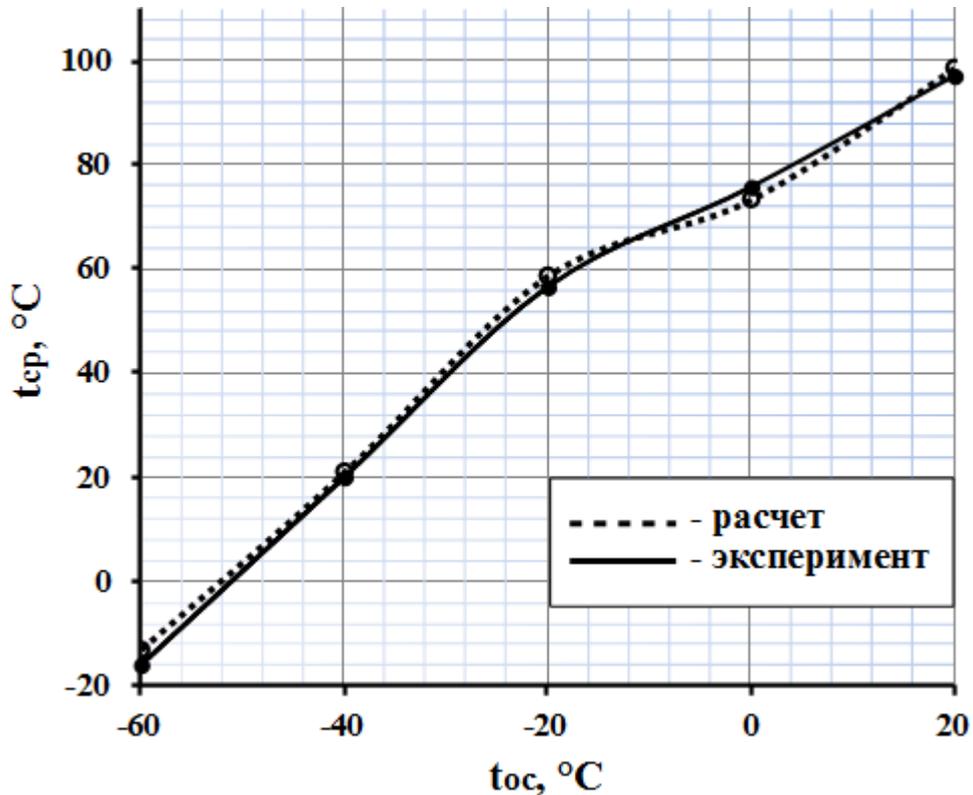


Рисунок 3.6 – Изменение средней температуры в цилиндре дизеля

Полученные в ходе исследований результаты, позволяют сделать вывод о том что в диапазоне температур окружающей среды от минус 20 °С до минус 60 °С с понижением температуры окружающей среды на 1°С, средняя температура в камере сгорания уменьшается примерно на 2 °С. При температуре окружающей среды от минус 20 °С и выше, интенсивность увеличения средней температуры в камере сгорания снижается (рисунок 3.6).

С понижением температуры окружающей среды отмечено практически линейное снижение средней пусковой частоты дизеля. Так при снижении температуры окружающей среды от плюс 20 °С до минус 60 °С, средняя пусковая частота снижается практически в 2 раза (рисунок 3.7).

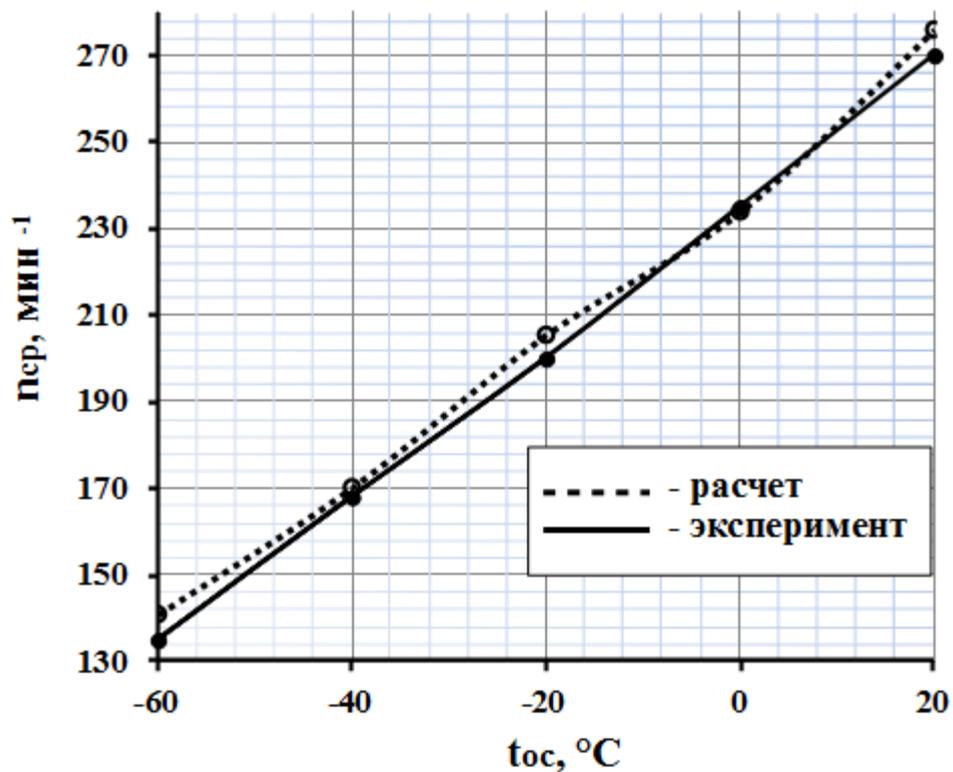


Рисунок 3.7 – Изменение средней пусковой частоты дизеля

С понижением температуры окружающей среды так же существенно увеличивается неравномерность прокручивания коленчатого вала. В условиях окружающей среды минус 60 °C угловая скорость коленчатого вала в конце такта сжатия уменьшается до 8 рад/сек. (рисунок 3.8).

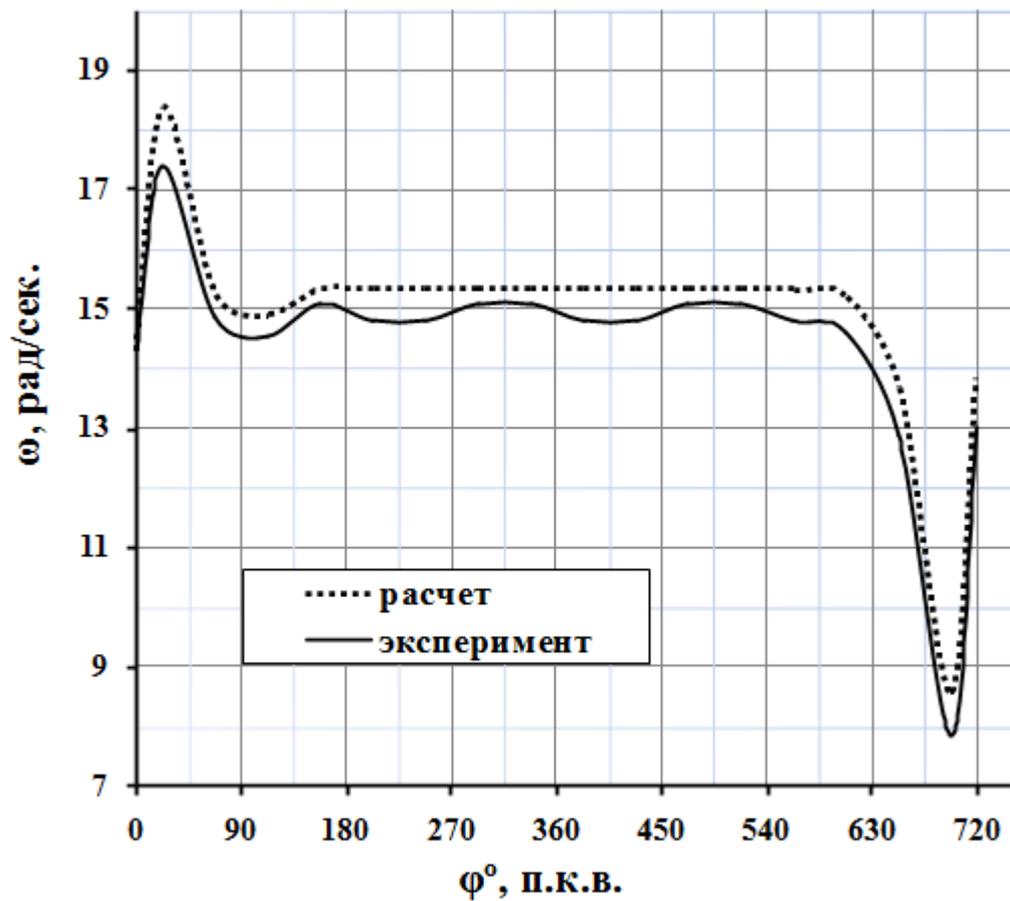


Рисунок 3.8 – Изменение угловой скорости в цикле при температуре окружающей среды

Из рисунков 3.6 – 3.8 видно, что расхождения в определении средних значений температур и пусковой частоты, а так же в определении изменения угловой скорости в цикле по математической модели не превышают 10 % по сравнению с экспериментальными данными.

Предлагаемый подход позволяет спрогнозировать уровень температуры рабочего тела в цилиндре при отрицательных температурах окружающей среды с учетом изменения основных конструктивных и эксплуатационных параметров, таких как: температура воздуха на впуске, компрессия дизеля, пусковая частота и др.

3.5 Закономерности влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на пусковые характеристики дизеля при температуре минус 60 °С

В результате проведенных исследований, представленных в предыдущих главах, определены основные параметры, влияющие на температуру в камере сгорания на режиме пуска в условиях отрицательных температур. Этими параметрами являются температура воздуха на впуске и пусковая частота дизеля.

С помощью разработанной математической модели была проведена серия вычислительных экспериментов для исследования влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания дизеля. На рисунках 3.9 – 3.11 приведены результаты проведенных исследований.

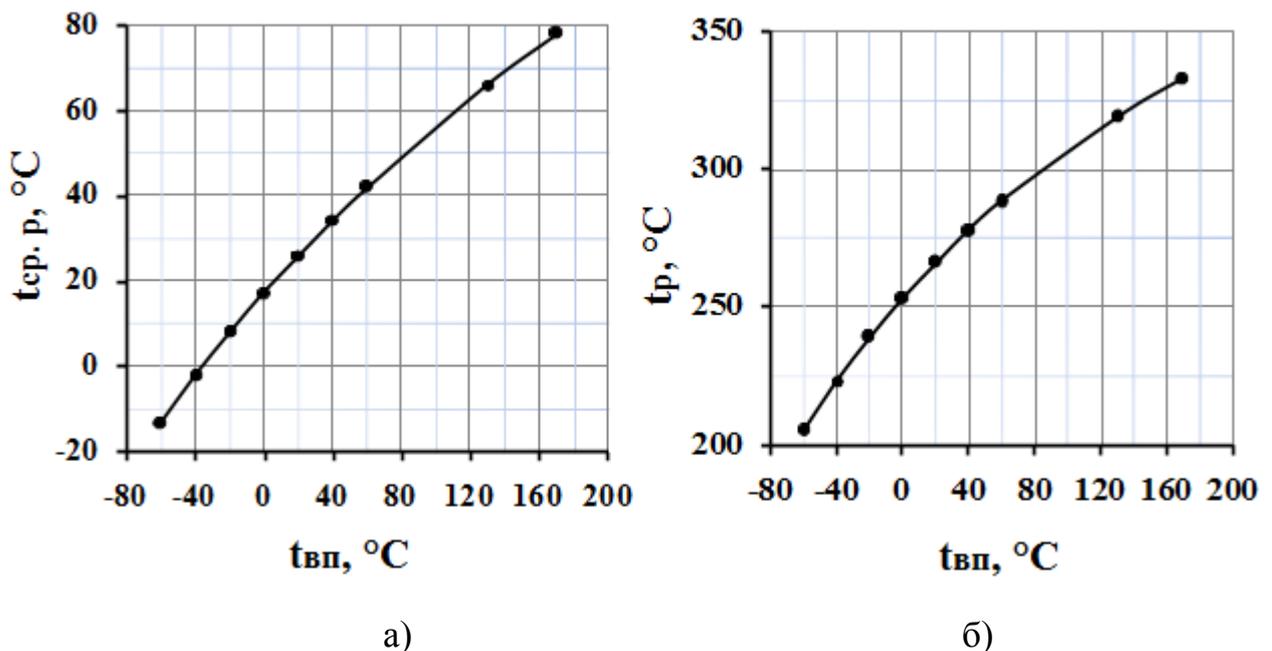


Рисунок 3.9 – Изменение средней (а) и максимальной (б) температуры в камере сгорания дизеля в зависимости от температуры воздуха на впуске

Влияние эквивалентной площади утечек в ЦПГ на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания отражено на рисунке 3.10.

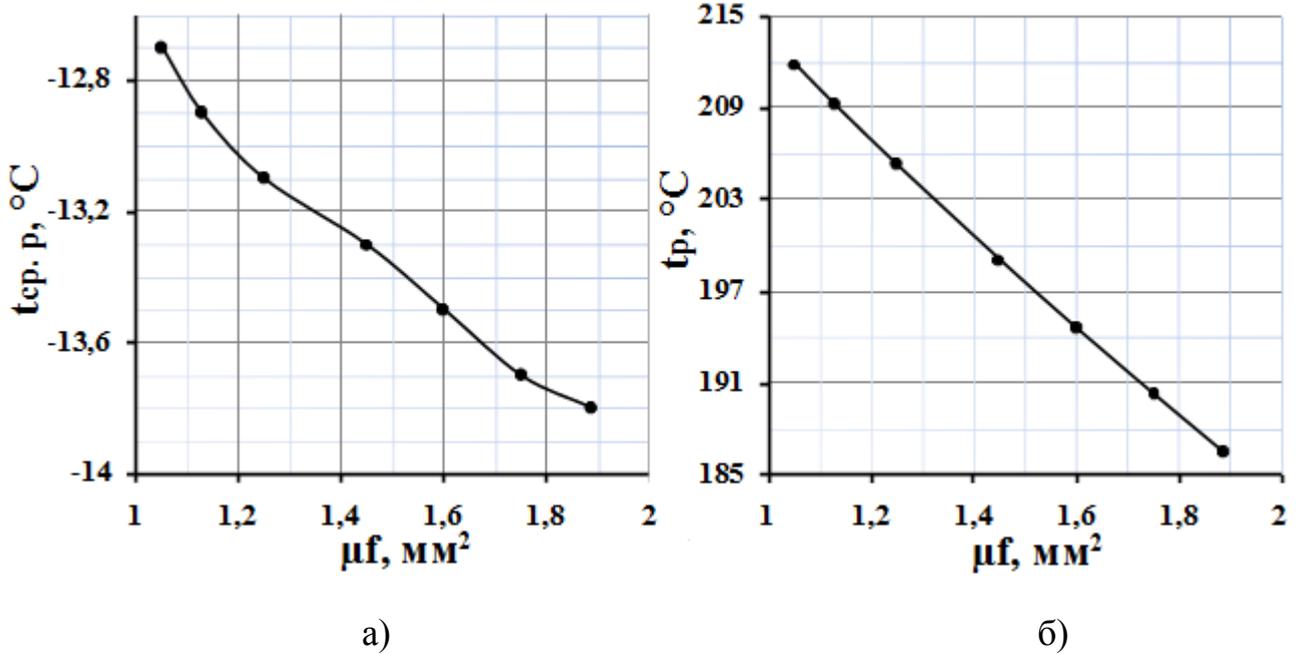


Рисунок 3.10 – Изменение средней (а) и максимальной (б) температуры камере сгорания в зависимости от эквивалентной площади утечек в ЦПГ

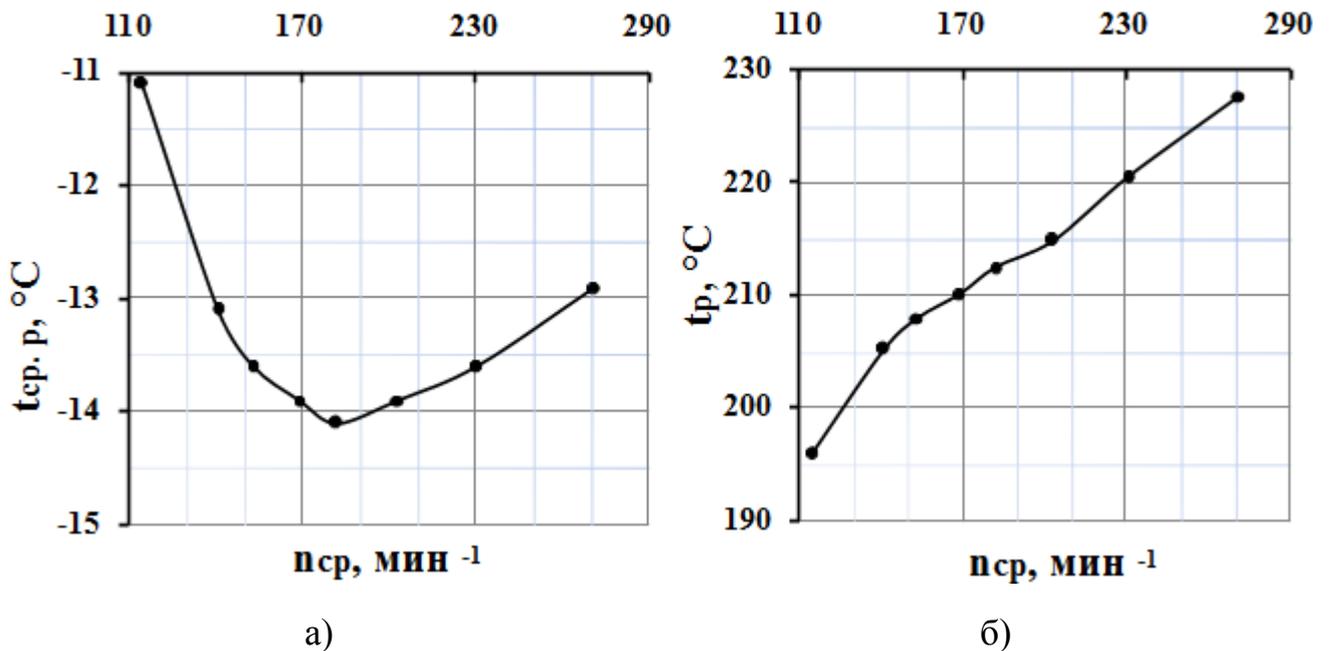


Рисунок 3.11 – Изменение средней (а) и максимальной (б) температуры в камере сгорания дизеля в зависимости от средней пусковой частоты

С повышением средней пусковой частоты дизеля резко увеличивается максимальная температура в камере сгорания в конце такта сжатия (рисунок 3.11). Однако проведенный расчет показал, что при температуре воздуха минус 60°C с

увеличением скорости прокручивания коленчатого вала, камера сгорания не успевает самостоятельно прогреваться и даже происходит ее охлаждение. Пороговым значением пусковой частоты является величина 180 мин^{-1} , при которой наблюдается минимальная средняя температура в камере сгорания. При увеличении пусковой частоты выше 180 мин^{-1} наблюдается рост средней температуры в камере сгорания.

Анализ проведенных расчетных исследований показал:

- с повышением температуры впускного воздуха значительно увеличивается средняя и максимальная температура в камере сгорания дизеля (рисунок 3.9). В частности с увеличением температуры впускного воздуха $t_{вп}$ до плюс $80 \text{ }^\circ\text{C}$ расчетная температура в цилиндре t_p достигает $298 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре впускного воздуха $t_{вп} 150 \text{ }^\circ\text{C}$ расчетная температура в цилиндре t_p достигает $325 \text{ }^\circ\text{C}$.

- с увеличением эквивалентной площади утечек в ЦПГ средняя и максимальная температура в камере сгорания дизеля значительно снижается (рисунок 3.10).

- с повышением пусковой частоты дизеля максимальная температура в камере сгорания существенно увеличивается (рисунок 3.11). Увеличение μ_f на $0,8 \text{ мм}^2$ приводит к падению расчетной температуры в цилиндре t_p с плюс $211 \text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $186 \text{ }^\circ\text{C}$.

- на определенных режимах прокручивания коленчатого вала отмечено появление эффекта охлаждения камеры сгорания. Для различных температур окружающей среды этот режим будет находиться в различных диапазонах средней частоты прокручивания.

Сочетание этих факторов может оказать существенное влияние на надежность пуска и работу дизеля при температуре окружающей среды до минус $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.6 Математическое моделирование процесса пуска дизеля с выходом на режим холостого хода

При математическом моделировании процесса пуска дизеля с учетом подачи топлива приняты следующие допущения:

- угол начала сгорания определялся с учетом рекомендаций, приведенных в работе [4] и связанных с возрастанием периода задержки воспламенения в условиях низких температур до 2,5 раз;

- цикловая масса топливной смеси (пусковая) $m_{ц}$, рассчитывалась как произведение плотности топливной смеси на цикловой объем впрыснутого топлива при соответствующем положении рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД). Расчет цикловой массы топливной смеси представлен в приложении 10.

- доля сгоревшего топлива принималась равной 15 % с учетом рекомендаций приведенных в работе [32].

- угол продолжительности сгорания φ_z рассчитывался по формуле Шаролазова [71]:

$$\varphi_z = 135 \cdot \alpha^{-1,36} + 25 \quad (3.10)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

Исследования, проведенные Игнатовым М.С. [25] показали, что скорость выгорания топлива в дизеле ТМЗ-450Д с идентичным рабочим процессом имеет два максимума. Для определения показателей сгорания m_1 и m_2 использовались формулы, полученные для аналогичного дизеля, представленные в работе [5]:

$$m_1 = 1,34 \cdot B_T \cdot r_{CO_2}^{0,33} \quad (3.11)$$

где G_T – часовой расход топлива (пусковой), кг/ч; r_{CO_2} – коэффициент концентрации CO_2 в топливовоздушной смеси, %.

$$m_2 = 2,65 \cdot 10^{-14} \cdot r_{H_2O} \cdot \Delta P^{3,2} \cdot t_{cm}^{-1,05} \quad (3.12)$$

Где r_{H_2O} – коэффициент концентрации H_2O в топливовоздушной смеси, %; ΔP

– давление топливовоздушной смеси, Па; $t_{см}$ – температура топливовоздушной смеси, °С.

В качестве условия воспламенения топлива в модели задавалось неравенство $t_p > 300$ °С [17] с учетом смеси керосин ТС-1 75 % и ДТ 25 %.

В результате проведенного расчета на режиме пуска, с учетом подачи топлива, получена динамика изменения частоты вращения коленчатого вала дизеля 1Ч9,5/8,0 при выходе на режим холостого хода 2600 мин^{-1} , в условиях температуры окружающей среды минус 65 °С (рисунок 3.12). Температура впускного воздуха была равной плюс 150 °С.

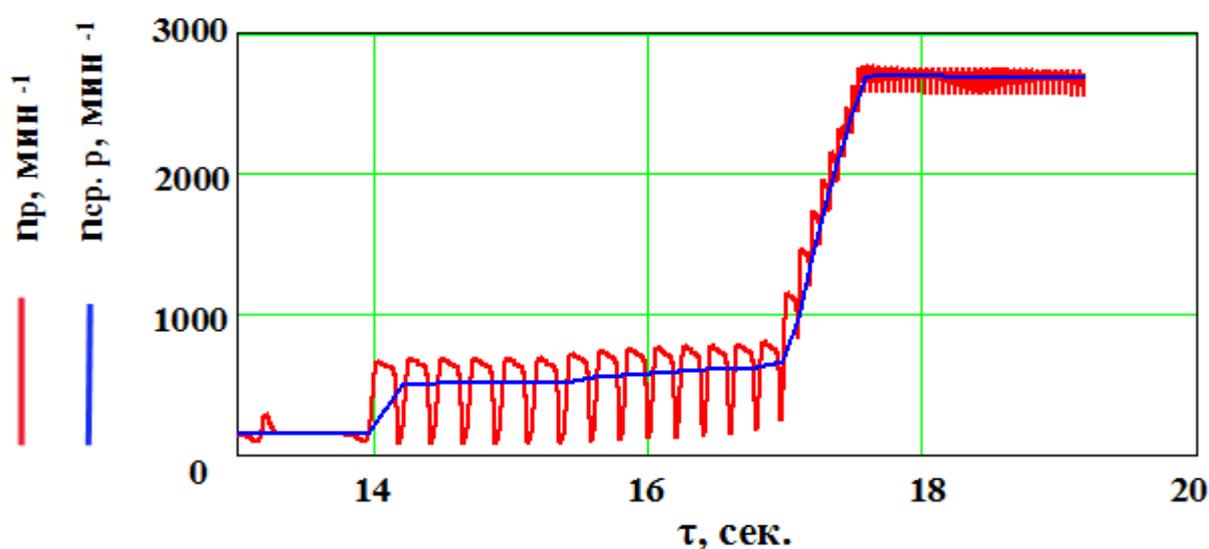


Рисунок 3.12 – Изменение частоты коленчатого вала при пуске дизеля с выходом на режим холостого хода

Сравнение результатов моделирования осуществлялось с экспериментальными данными процесса пуска дизеля с выходом на режим холостого хода 1Ч9,5/8,0 при температуре окружающей среды минус 65 °С, полученными в ходе эксперимента в климатической камере КТВВ 8000 отдела «Надежности» АО «АК «Туламашзавод» (п. 4.3).

Из рисунка 3.13 видно, что расхождение в определении изменения частоты вращения по математической модели не превышает 10 % по сравнению с экспериментальными данными.

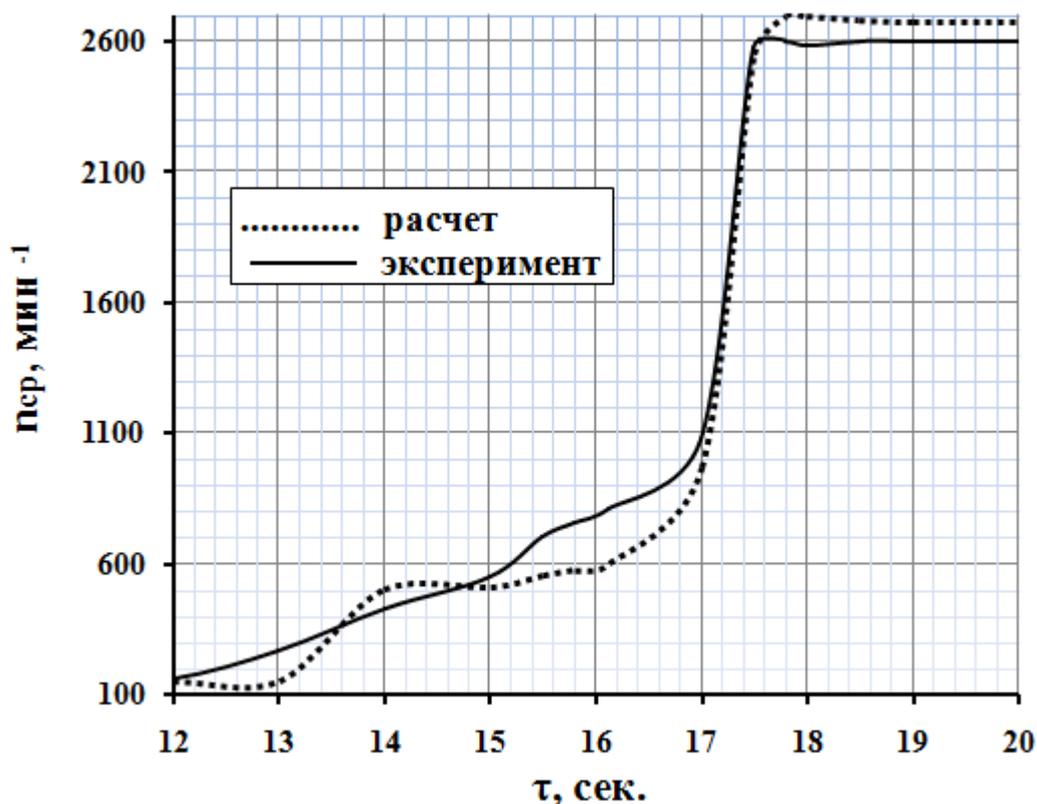


Рисунок – 3.13 Изменение частоты вращения коленчатого вала при пуске дизеля и выходе на режим холостого хода

Таким образом, разработанное математическое и программное обеспечение позволяют спрогнозировать возможность пуска одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением во всем диапазоне отрицательных температур, а так же оценить динамику пуска с учетом изменения конструктивных и эксплуатационных особенностей дизеля.

Разработанная модель может использоваться для расчета пуска двигателя аналогичного класса, при этом для получения исходных данных для моделирования необходимо проводить работы по индцированию процесса пуска.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Наиболее часто используемые при исследовании средств пусковой подго-

товки, устройств облегчения пуска, моделирования процесса прогрева ПДВС и его систем, являются динамические модели.

2. Разработана комплексная динамическая математическая модель предпусковой подготовки, пуска и функционирования дизеля в условиях арктических температур. Реализация модели на ЭВМ с помощью программного обеспечения позволяет получить для пускового режима и работы дизеля типа 1Ч9,5/8,0 закономерности изменения параметров состояния рабочего тела в цилиндре при отрицательных температурах окружающей среды.

3. Установлены параметры влияния температуры воздуха на впуске, эквивалентной площади утечек в ЦПГ, средней пусковой частоты на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания дизеля.

4. Полученные результаты расчета свидетельствуют о невозможности пуска рассматриваемого дизеля в условиях температуры окружающей среды минус 60 °С. Температура в камере сгорания при прокручивании дизеля стартером не превышает 205 °С. С увеличением температуры впускного воздуха $t_{вп}$ до плюс 80 °С расчетная температура в цилиндре t_p достигает 298 °С. При температуре впускного воздуха $t_{вп}$ 150 °С расчетная температура в цилиндре t_p достигает 325 °С что является достаточным для воспламенения топливо-воздушной смеси 300 °С [17].

5. Выполненные расчетные исследования подтверждают эффективность подачи во впускную систему подогретого воздушного заряда с целью повышения температуры в камере сгорания в конце такта сжатия во всем диапазоне отрицательных температур воздуха.

6. Полученные результаты можно использовать для проведения анализа соответствия температуры в цилиндре температуре самовоспламенения топливо-воздушной смеси, учитывая изменения компрессии дизеля, в зависимости от температур на впуске.

ГЛАВА 4. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПУСКА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СПОСОБА В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

4.1. Предварительные замечания

Четвертая глава диссертационного исследования посвящена реализации пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды.

Приводятся результаты проведенных исследований по оценке влияния степени (и способа) подогрева впускного воздуха на температуру в камере сгорания дизеля. Проведен сравнительный анализ средних значений температур рабочего тела в камере сгорания дизеля с прогревом впускного воздуха и без прогрева.

На основе полученных результатов предложен способ пуска дизеля и конструкция устройства, реализующая данный способ. Рассмотрены особенности работы предлагаемого устройства подогрева. Разработаны рекомендации пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур воздуха окружающей среды.

Приведены результаты эксперимента пуска дизеля предложенным способом при арктических температурах окружающей среды. Проведен сравнительный анализ пуска и работы дизеля в условиях арктических температур окружающей среды с использованием устройств подогрева впускного воздуха с нагревательными элементами различной мощности. Для предлагаемого способа получены закономерности пуска, связывающие температуру впускного воздуха с возможностью пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды. Сформулированы выводы.

4.2. Исследования закономерностей влияния степени и способа подогрева впускного воздуха на температуру в камере сгорания

Для надежного пуска дизеля необходимо, чтобы температура в конце такта сжатия превышала температуру самовоспламенения топлива. Поскольку температура в конце такта сжатия определяется в первую очередь температурой в конце такта впуска, то указанное условие можно выполнить за счет предварительного подогрева воздуха, поступающего в цилиндр. В опубликованных работах [42, 6, 38, 18, 30], посвященных исследованиям и разработкам систем подогрева воздуха во впускном трубопроводе для облегчения пуска дизелей, минимальные температуры рассматриваются не ниже минус 40 °С, что затрудняет использование этих результатов для более низких отрицательных температур окружающей среды.

Учитывая результаты анализа патентных решений и научных трудов по вопросам облегчения пуска в условиях отрицательных температур окружающей среды, реализация в конструкции рассматриваемого дизеля устройства подогрева воздуха на впуске с последующей его принудительной подачей в цилиндр является наиболее эффективным способом обеспечения гарантированного пуска при арктических температурах окружающей среды. В данном случае уровень подогрева воздуха на впуске будет непосредственно влиять на величину температуры в камере сгорания, а развиваемый вентилятором турбулентный поток должен способствовать более качественному перемешиванию различных по температуре потоков впускного воздуха.

Экспериментальные исследования проводились в климатической камере отдела «Надежности» АО «АК «Туламашзавод».

Цель испытаний – определение степени влияния подогрева впускного воздуха, принудительно подаваемого в цилиндр дизеля, на температуру в камере сгорания.

Объект исследования и средства измерения аналогичны применяемым в п. 2.6.

Для сопоставления результатов данный эксперимент проводился в полном соответствии с экспериментом, рассмотренном в п. 2.6.1 и п.2.6.2.

Дизель с нагнетателем теплого воздуха и термодатчиками помещали в климатическую камеру (рисунок 4.1). Между впускным каналом в головке цилиндра и источником теплоты на расстоянии 2 – 3 см по оси канала была установлена хромель-копелевая термопара, регистрирующая температуру воздуха, подаваемого в камеру сгорания. Вторая термопара устанавливалась в камеру сгорания через корпус форсунки, на конце которой находился изолированный от форсунки чувствительный элемент не соприкасающийся с деталями цилиндропоршневой группы. При прокручивании коленчатого вала дизеля электростартером, эмитируя пуск, в цилиндр дизеля через впускной трубопровод принудительно подавался предварительно разогретый воздух.

Мощность нагревателя теплого воздуха при проведении всех экспериментов оставалась постоянной и соответствовала температуре нагревательного элемента плюс 250 °С, устанавливаемая на цифровом табло нагнетателя теплого воздуха.

Так как при имитации пуска открытие и закрытие клапанов в момент останова дизеля не контролировалось, нагнетатель горячего воздуха в перерывах между попытками отключался, во избежание возможности возникновения помпажа и выхода из строя нагнетателя. Устройство включалось за несколько секунд до начала последующей попытки.



Рисунок 4.1 – Фото дизеля с нагнетателем теплого воздуха на впуске

В качестве нагнетателя теплого воздуха использовался термопистолет DEXTER HG-DP2000-LCD с возможностью дистанционного управления и регулирования его расхода и температуры, с целью анализа влияния подогрева воздуха на впуске на температуру в камере сгорания в процессе прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером. Устройство размещалось во впускном трубопроводе на расстоянии 5-7 см (рисунок 4.1.) от впускного канала в головке цилиндра.

Скорость потока теплого воздуха, вырабатываемого термопистолетом, определялась с помощью приёмника воздушного давления и микроманометра ММН-240 по следующей зависимости:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_n - p_c)} \xi,$$

где p_n – полное давление (Па), p_c – статическое давление (Па), $\rho = \frac{p}{RT}$ – плотность воздуха, p , T – давление (Па) и температура (К) окружающей среды, R

– газовая постоянная воздуха $\left(\frac{Дж}{кг \cdot К} \right)$, x – коэффициент приемника воздушного давления (1,02–1,04).

По скорости потока в условиях развитого турбулентного режима течения, определялась объёмная производительность, проверялись технические характеристики нагнетателя, а значит возможность его использования.

Результаты эксперимента при прокручивании коленчатого вала дизеля при помощи стартера с подачей во впуск разогретого воздушного заряда представлены на рисунке (рисунок 4.2).

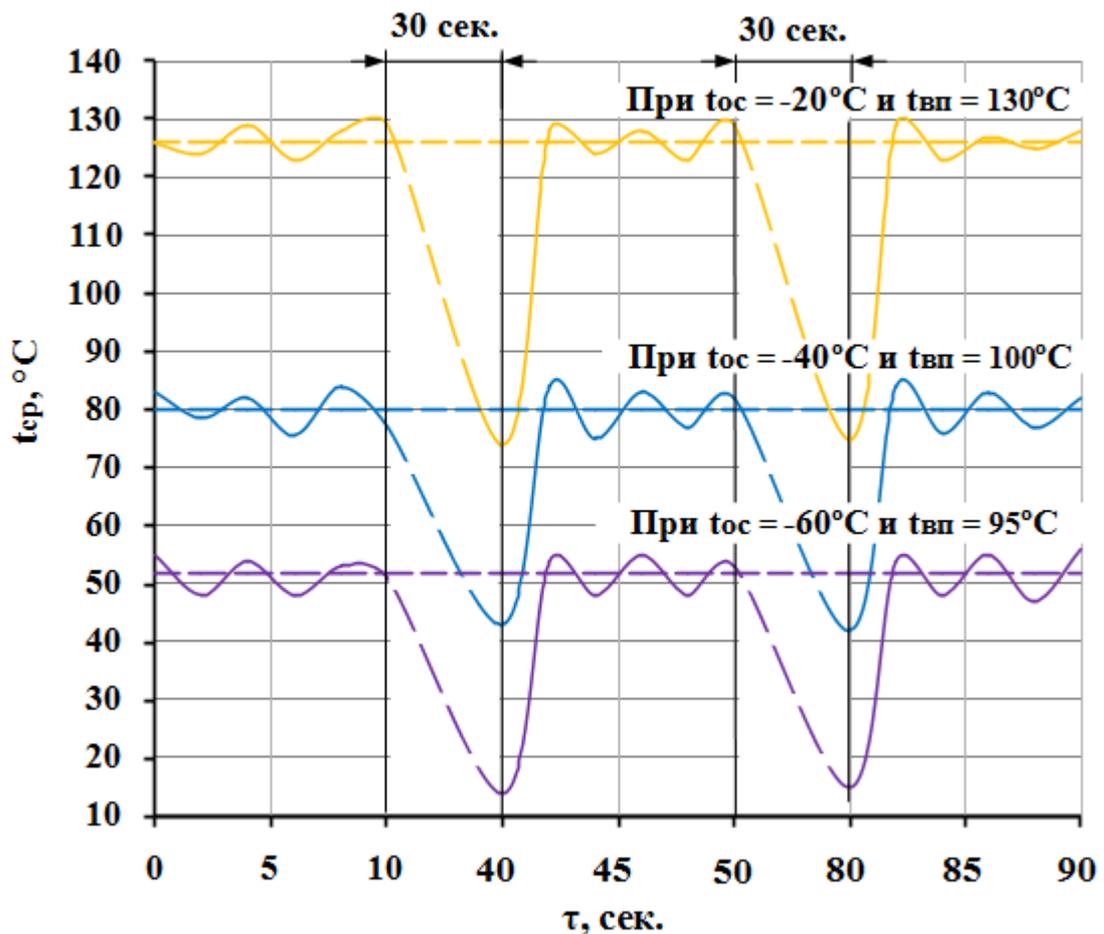


Рисунок 4.2 – Изменение средней температуры воздуха в камере сгорания с принудительной подачей во впуск нагретого воздушного заряда при различных температурах окружающей среды

Сравнительные результаты средних значений температур рабочего тела в камере сгорания с прогревом впускного воздуха и представленные в пункте 2.6.1 без прогрева, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Результаты средних температур рабочего тела в камере сгорания дизеля при прокручивании коленчатого вала дизеля электростартером, с прогревом впускного воздуха и без прогрева

Температура окружающей среды t , °С	Средняя температура впускного воздуха t_{cp} , °С	Средняя температура в камере сгорания с нагретым впускным воздухом t_{cp} , °С	Средняя температура в камере сгорания без прогрева впускного воздуха t_{cp} , °С
минус 20	130	126,2	56,5
минус 40	100	80,3	20
минус 60	95	51,9	Минус 16,0

В частности, для рассматриваемого дизеля, при температуре окружающей среды минус 60 °С, подача нагретого воздуха во впускном трубопроводе до плюс 95 °С позволяет повысить среднюю температуру в камере сгорания на режиме пусковой частоты в 4,25 раза.

Полученные результаты могут быть использованы для анализа соответствия температуры в цилиндре температуре самовоспламенения топливовоздушной смеси при проведении расчетов и конструировании систем подогрева впускного воздуха.

Полученные результаты позволяют выработать рекомендации для облегчения пуска дизеля в условиях низких отрицательных температур окружающей среды за счет применения системы подогрева воздуха во впускном трубопроводе.

4.3. Исследования закономерностей пуска дизеля способом принудительной подачи в цилиндр дизеля предварительно разогретого воздушного заряд

В данном подразделе рассматриваются результаты пуска дизеля при температуре окружающей среды минус 65 °С, путем принудительной подачи в цилиндр дизеля предварительно разогретого воздушного заряд. Температура была взята с запасом с целью уверенности обеспечения гарантированного пуска при температуре окружающей среды минус 60 °С. Эксперимент проводился как с устройством принудительной подачи нагретого воздуха так и без него.

Для определения температуры воздуха на впуске, как и в предыдущем эксперименте, во впускном патрубке была установлена термопара.

Температура внешней поверхности головки цилиндра контролировалась при помощи термопары, закрепленной на боковом ребре головки цилиндра, в зоне камеры сгорания (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Расположение термопары на ребре головки цилиндра

В ходе эксперимента были проведены исследования температуры застывания ДТ. Установлено, что для летнего ДТ ЕВРО ГОСТ Р 52368 (ЕН 590:2009 Класс 4) оптимальное соотношение смеси составляет 20 % ДТ и 80 % керосина ТС – 1 при температуре окружающей среды минус 60 °С. Для зимнего ДТ соотношение смеси составляет 25 % ДТ и 75 % керосина ТС – 1. Для ДТ «Арктика» соотношение смеси составляет 40 % ДТ и 60 % керосина ТС – 1.

В эксперименте использовалась смесь зимнего ДТ разбавленное керосином ТС – 1 в соотношении 25 % ДТ и 75 % керосина ТС – 1.

Эксперимент проводился с предпусковой подготовкой, аналогичной представленной в п.2.4, п. 2.6.

Пуск дизеля без устройства принудительной подачи нагретого воздуха включал четыре попытки, которые оказались безуспешными. В ходе проведения экспериментальных исследований, с целью облегчения роста температуры в камере сгорания, было принято решение об увеличении времени прокручивания коленчатого вала(попытки) до 15 секунд и уменьшение времени между попытками с 30 секунд до 15 секунд

С использованием устройства принудительной подачи нагретого воздуха, которое включалось за 1 минуту до начала прокручивания, дизель запустился со второй попытки. Динамика второй попытки показана на рисунке 4.4. Работа дизеля с помощью стартера составила 13 – 15 секунд после чего стартер был выключен, дизель продолжал самостоятельно набирать обороты и в течении 3 – 4 секунд после отключения стартера вышел на фиксированную частоту холостых оборотов коленчатого вала 2600 мин⁻¹. Устройство подогрева при этом не выключалось. Температура впускного воздуха в первоначальный момент времени составила 150±2 °С. С нарастанием средней частоты прокручивания коленчатого вала наблюдалось падение температуры впускного воздуха. Следует отметить тот факт, что время нарастания пусковой частоты вращения коленчатого вала n_{CP} после отключения стартера с 500±50 мин⁻¹ до 1000 ±50 мин⁻¹ составило около 3-х секунд и далее за 1/2 секунды дизель стремительно набрал обороты до заданного режима. Далее продолжалась работа на топливе в климатической камере в течении 13 ми-

нут. После чего дизель был остановлен принудительно. При самостоятельной работе на фиксированной частоте холостого хода дизель сохранял устойчивую работу, температура впускного воздуха при этом находилась в диапазоне 80 – 90 °С. При разогреве впускного воздуха более плюс 180±2 °С в момент пуска, вспышки в цилиндре дизеля приобретали менее устойчивый характер и при достижении температуры плюс 200±2 °С и выше полностью исчезали. На девятой минуте с начала пуска второй попытки отключили устройство подачи нагретого воздуха, при этом дизель продолжал самостоятельную работу на топливе с частотой холостого хода 1300±50 мин⁻¹. При этом работа дизеля приобретала затухающий характер. На 11 – ой минуте при отключении подогрева впускного воздуха наблюдалось быстрое снижение оборотов холостого хода. Стоит отметить достаточно жесткую работу дизеля, вызванную низкой температурой окружающей среды, возрастанием времени задержки воспламенения и низким значением цетанового числа используемого топлива, в котором большую часть составил керосин ТС – 1.

Установлено, что отключение устройства подогрева воздуха приводит к падению оборотов дизеля с пропуском воспламенения и неустойчивой работой (рисунк. 4.4). С увеличением частоты вращения значительно возрастает интенсивность охлаждения камеры сгорания за счет увеличения скорости и количества подмешанного холодного воздуха на впуске. Так же значительно возрастает интенсивность охлаждения головки цилиндра потоком воздуха, развиваемым вентилятором маховика дизеля, что значительно препятствует прогреву дизеля.

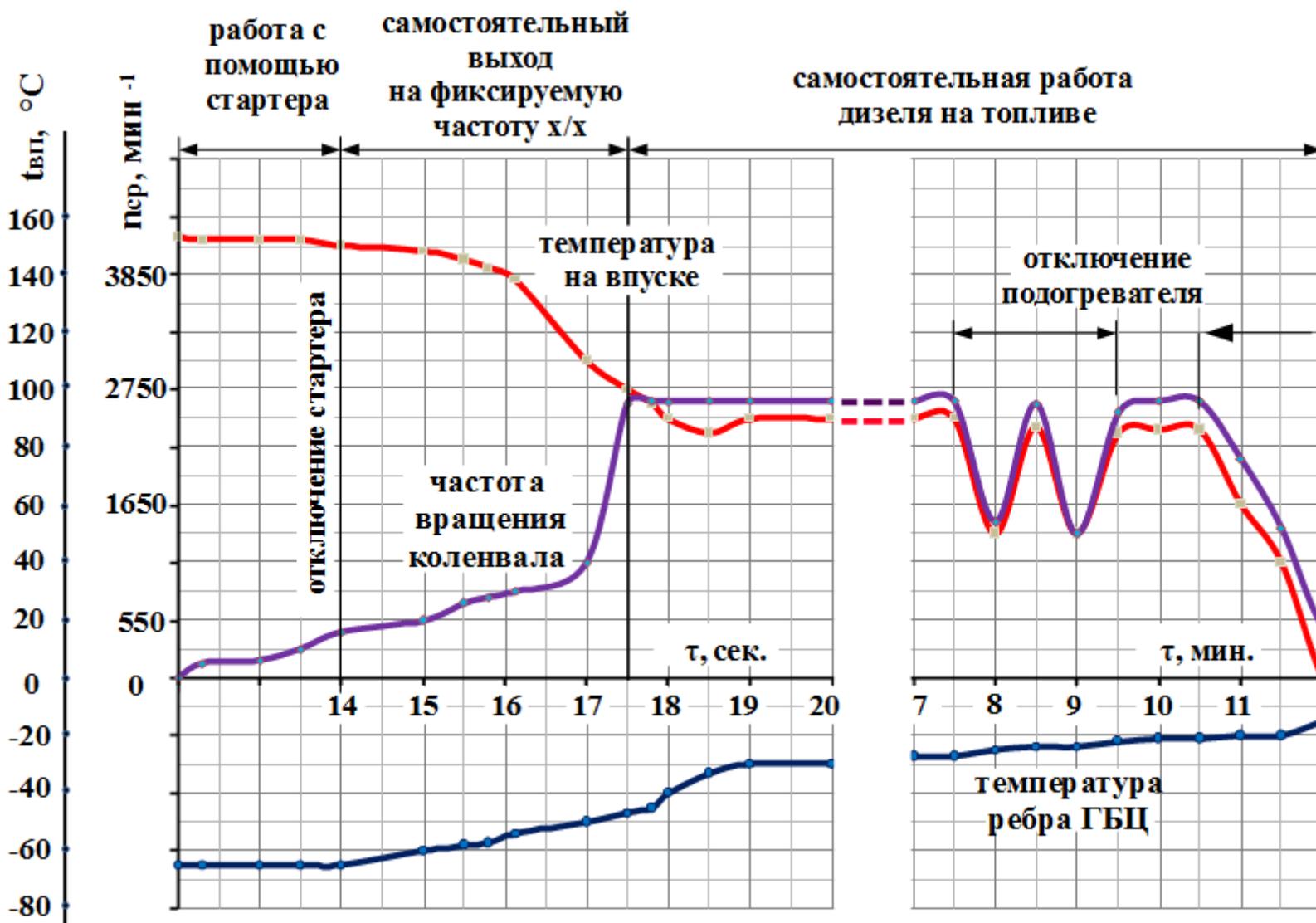


Рисунок 4.4 – Пуск дизеля при температуре окружающей среды минус 65°C

Таким образом:

- осуществлен надежный пуск одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур окружающей среды минус 65 °С.

- подтверждена высокая эффективность способа принудительной подачи в цилиндр дизеля предварительно разогретого воздушного заряда для пуска дизеля в условиях арктических температур.

- максимальная температура впускного воздуха при которой пуск дизеля возможен, в условиях температур окружающей среды до минус 60 °С, составляет плюс 170 ± 5 °С при средней пусковой частоте 130 - 140 мин⁻¹.

4.4 Разработка и апробация устройства подогревателя впускного воздуха (ПВВ)

4.4.1 Устройство и принцип действия ПВВ

Исходя из результатов проведенных экспериментальных исследований процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля, изложенных в п. 4.3, а также с учетом обзора научных трудов и патентов, посвященных вопросам облегчения пуска дизельных двигателей в условиях отрицательных температур, разработан действующий макетный образец подогревателя впускного воздуха (ПВВ) с напряжением питания 24 В и мощностью 250 ± 50 Вт. Так же учитывались проведенные расчеты пускового режима работы дизеля 1Ч9,5/8,0 представленные в главе 3.

На рисунке 4.5 показан общий вид дизеля, с доработанной впускной системой, расположенного в климатической камере.

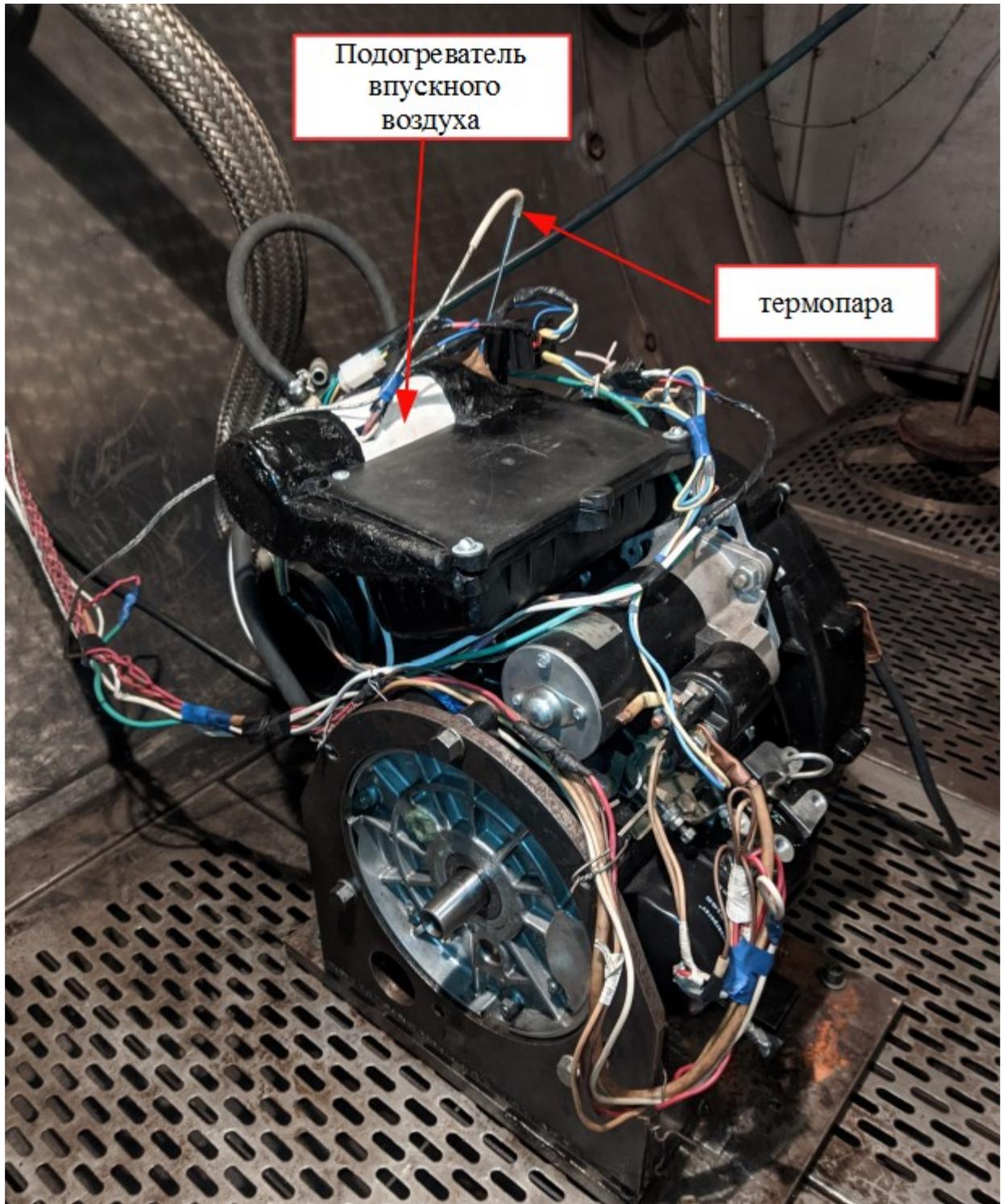


Рисунок 4.5 Общий вид дизеля в климатической камере с встроенным подогревателем ПВВ в корпус воздушного фильтра

Устройство ПВВ представляет собой цилиндрический корпус, изготовленный из полимерного материала, в который вставлен нагревательный элемент с электровентилятором. Нагревательный элемент представляет собой спираль, вы-

полненную из фехральной либо нихромовой проволоки, обвивающую изолятор (рисунок 4.6). Изолятор изготавливается из пластин термостойкого миканита. Для принудительной подачи нагретого воздуха на режиме предпусковой подготовки и непосредственно в момент пуска, в изолятор вставлен электродвигатель с вентилятором таким образом, что бы первый виток спирали-нагревателя располагался напротив щеточного узла электродвигателя в одной с ним плоскости. Такое решение позволяет исключить возможность промерзания щеток коллектора к ротору электродвигателя. Для снижения теплоотдачи в цилиндрический корпус устройства, между корпусом и спиралью-нагревателем предусмотрена цилиндрическая термостойкая вставка, выполненная из гибкого листа слюды.

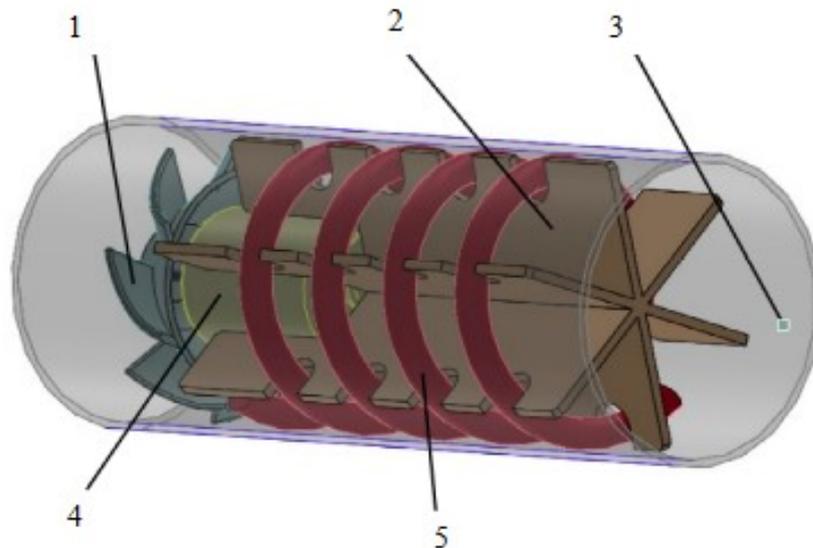


Рисунок 4.6 – Подогреватель впускного воздуха:

1– крыльчатка — вентилятор, 2– изолятор, 3– корпус, 4– электродвигатель ,5– спираль-нагреватель

Схема питания устройства представляет собой два независимых друг от друга контура: контур подключения электродвигателя и контур включения нагревательного элемента. Спираль-нагреватель включается отдельным от электровентилятора тумблером, заблаговременно до включения электровентилятора. Это необходимо для прогрева щеточного узла электродвигателя. Время включения за-

висит от температуры окружающей среды и составляет от 2 до 10 секунд. В электрической цепи спирали–нагревателя, в качестве регулятора температуры может быть предусмотрен датчик температуры контактного типа, либо отключение устройства может производить оператор принудительно. Принцип работы датчика основан на изгибании термобимиталической пластины заключенной в корпус датчика. При перегреве контакты термобимиталической пластины датчика замыкаются и срабатывает короткозамкнутое реле в цепи нагревателя. Контакты реле нагревателя размыкаются тем самым размыкая цепь питания спирали–нагревателя. Таким образом происходит отключение спирали-нагревателя.

На рисунке 4.7 [57] более детально представлено расположение ПВВ в корпусе воздушного фильтра на дизеле. Свежий заряд нагнетается в корпус воздушного фильтра маховиком – вентилятором центробежного типа (рисунок 4.7б). Стрелками синего цвета показан забор и движение свежего воздуха из окружающей среды. Пройдя фильтрацию (рисунок 4.7а) холодный воздух засасывается вентилятором (рисунок 4.7г) и далее происходит его нагрев и подача во впускной канал головки цилиндра дизеля. Красными стрелками (рисунок 4.7а) показано движение нагретого воздушного заряда.

Технический результат достигается тем, что во впускной системе дизеля изготавливается дополнительный обводной (байпасный) воздухопровод в который устанавливается ПВВ (рисунок 4.7а,в). С целью снижения тепловых потерь обводной воздухопровод, с встроенным в него устройством ПВВ, необходимо располагать как можно ближе к впускному каналу головки цилиндра дизеля. В случае, если корпус воздушного фильтра с фильтрующим элементом размещены на дизеле таким образом, что выходное окно из корпуса воздушного фильтра соединяется непосредственно с впускным окном головки цилиндра, то обводной воздухопровод с устройством ПВВ целесообразно расположить в корпусе воздушного фильтра так, что бы направление потока воздуха из устройство было под углом 90° к торцу впускного канала в головке цилиндра дизеля (рисунок 4.7а). Такое расположение позволит подавать весь прогреваемый устройством воздух непосредственно во

впускной канал, откуда он будет полностью засасываться в процессе пуска и работы дизеля. Это позволит снизить потери теплоотдачи в момент пуска.

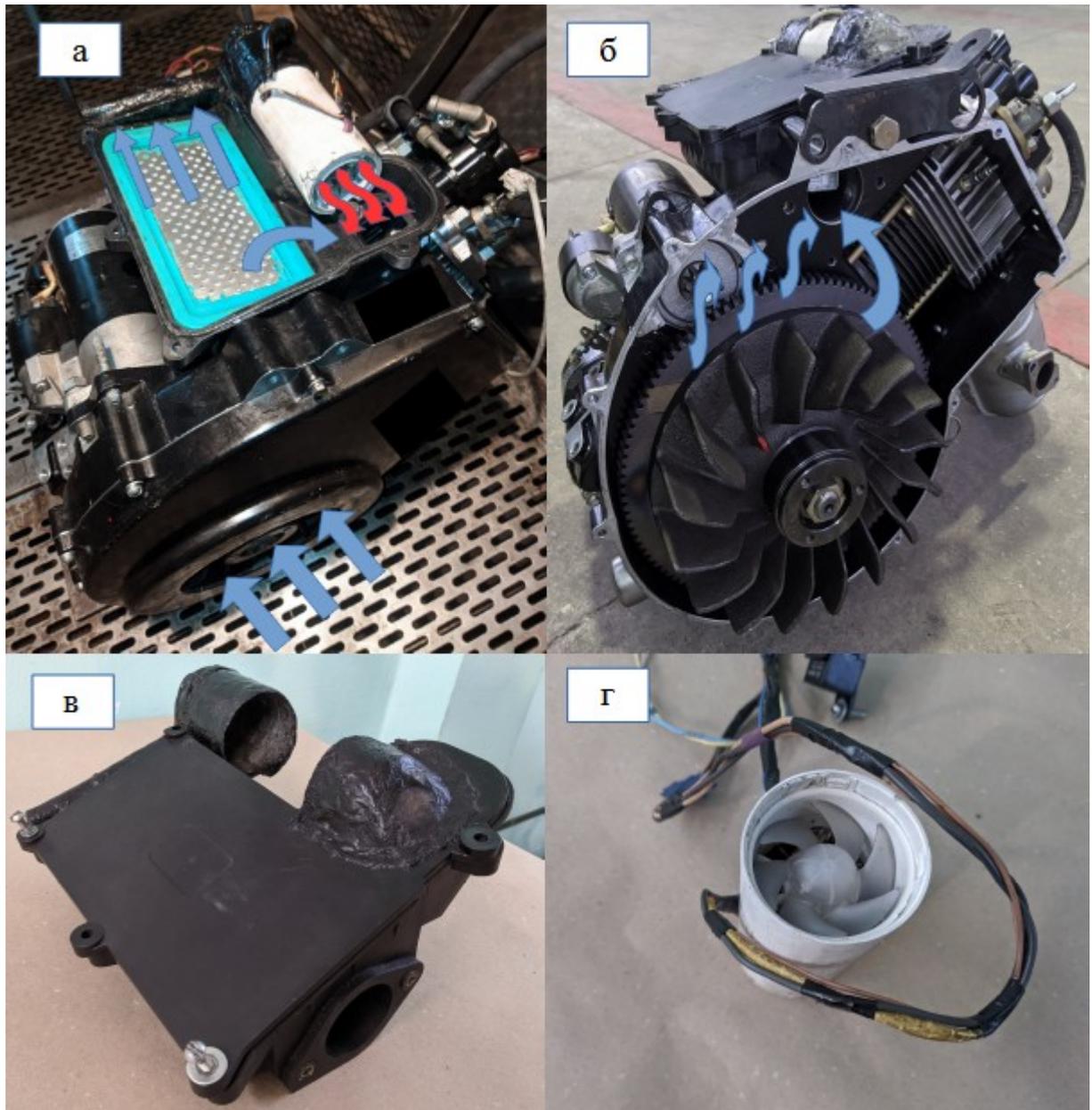


Рисунок 4.7 – Опытный образец ПВВ в обводном воздуховоде корпуса воздухо-ного фильтра на дизеля: а) – движение и прогрев впускного воздуха; б) – дизель без крышки корпуса вентилятора ; в) – обводной воздуховод в корпусе воздушного фильтра; г) – вид подогревателя воздуха со стороны вентилятора

Напротив, если требуется перед пуском произвести предварительный разогрев свежего воздушного заряда, то воздух по средствам вентилятора устройства ПВВ (рисунок 4.7г) циркулирует в корпусе воздушного фильтра, что способству-

ет его прогреву. Так же в этом случае прогревается впускной канал головки цилиндров и возникает вероятность частичного прогрева цилиндра и камеры сгорания дизеля в случае открытия впускного клапана.

В случае, если корпус воздушного фильтра с фильтрующим элементом расположены от головки дизеля на определенном расстоянии и соединены с впускным каналом воздушным патрубком, то обводной воздухопровод с устройством ПВВ целесообразно расположить параллельно основному воздуховоду в непосредственной близости к впускному каналу (рисунок 4.8).

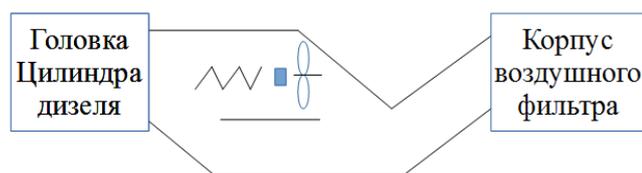


Рисунок 4.8 – Схема расположения обводного воздухопровод с ПВВ в воздушном патрубке

Технический результат направлен на улучшение пусковых, энергетических и экономических показателей дизельного малогабаритного дизельного двигателя с воздушным охлаждением, обеспечение полноты сгорания топлива при пуске малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях низких температур с использованием АКБ. Устройство может быть использовано как на режиме предпусковой подготовки, так и на режиме пуска.

К достоинствам устройства следует отнести:

- возможность предпускового прогрева камеры сгорания дизеля и воздуха находящегося в корпусе воздушного фильтра;
- низкую мощность нагревательного элемента;
- отсутствие электронного управления.

Отличительной особенностью является простота конструкции и низкая себестоимость, что особенно важно при эксплуатации в отдаленных районах от ин-

фраструктуры, где важна возможность устранить неисправность на месте, без использования специального инструмента и привлечения специализированных мастерских. ПВВ обладает сравнительно небольшими габаритами и легко интегрируется в конструкцию практически любого дизеля с рабочим объемом до 650 см³, обеспечивая автономный запуск, тем самым значительно повышая пусковые характеристики дизеля [56].

4.4.2 Сравнительный анализ пусков (работы) дизеля в условиях арктических температур окружающей среды

В ходе проведения данного диссертационного исследования произведены успешные пуски дизеля с использованием, представленного в п. 4.4.1. устройства ПВВ, интегрированного в корпус воздушного фильтра при температуре окружающей среды минус 50°C, минус 60°C, минус 68°C. Размещение корпуса воздушного фильтра на дизеле показано на рисунках 4.5, 4.7. По результатам экспериментов построены графики зависимости температуры воздуха на впуске от частоты вращения коленчатого вала дизеля на режиме пуска (рисунок 4.9 – 4.11). В таблице 4.2 отражен сравнительный анализ результатов пусков дизеля с макетным образцом ПВВ и пуска представленного в разделе 4.3.

Таблица 4.2

Результаты пуска дизеля в условиях арктических температур при средней пусковой частоте 130 – 140 мин⁻¹

№	Температура окружающей среды t_{oc} , (°C).	Температура впускного воздуха $t_{вп}$, (°C).	Время прогрева впускного воздуха τ (мин.).	Мощность нагревательного элемента P , (Вт).	Создаваемый поток впускного воздуха, (л/мин)	Количество попыток
1	минус 50 °C	75	5	250	~160	5
2	минус 60 °C	70	5	250	~160	4
3	минус 65 °C	170	1	1000	~190	2
4	минус 68 °C	35	4	250	~160	6-8

Из проведенного анализа общей динамики пусков с температурой впускного воздуха $t_{вп}$ от плюс 35 до плюс 70 °С (рисунок 4.9 – 4.11) видно, что во всех случаях, первая попытка пуска направлена на преодоление момента страгивания коленчатого вала и его раскручивание. Появление при этом вспышек в цилиндре не наблюдается. Работа дизеля сопровождается работой стартера. Средняя пусковая частота $n_{ср}$ в первые секунды прокручивания не более 70 мин⁻¹.

С увеличением средней пусковой частоты вращения коленчатого вала $n_{ср}$ до 130 – 140 мин⁻¹ динамика пуска значительно улучшается и при температуре подаваемого впускного воздуха плюс 35 °С (рисунок. 4.11) дизель выходит на самостоятельную работу на топливе (без помощи стартера) уже на 12-ой – 15-ой секунде соответствующих третей – четвертой попытках. При этом не достигнув фиксируемой частоты холостого хода, наблюдается резкое исчезновение вспышек. Такое явление объясняется резким наполнением цилиндра дизеля холодным воздухом во всем диапазоне $t_{ос}$ от минус 50 °С до минус 68 °С.

Пуски дизеля при температуре окружающей среды минус 50 °С (рисунок 4.9) и минус 60 °С (рисунок 4.10), с подачей воздуха прогретого до плюс 70 °С и плюс 75 °С, не имеют значительных различий и носят более уверенный характер по сравнению с пуском при температуре окружающей среды минус 68 °С (рисунок 4.11) с температурой впускного воздуха плюс 35 °С. С увеличением температуры подаваемого впускного воздуха до плюс 70 °С и плюс 75 °С, время пуска дизеля сокращается в два раза. Появление устойчивых стремительно нарастающих вспышек наблюдается на 2 – й и 3 – й попытках. При этом наблюдается рост средней пусковой частоты $n_{ср}$ до 1500 – 2000 мин⁻¹. Далее на 4 – й и 5 – й попытках после отключения стартера на 13 – 15 секунде, дизель уверенно выходит на фиксируемую частоту холостого хода 2600 мин⁻¹ и продолжает самостоятельную работу на топливе. Время выхода на режим холостого хода в этот период составляет не более 4 – х секунд. Следовательно, в камере сгорания сохраняется и продолжается рост температуры необходимой для воспламенения и горения топлива. Доля сгоревшего топлива увеличивается.

Однако работа дизеля после пуска при t_{oc} минус 60 °С и минус 50 °С существенно отличается. При t_{oc} минус 60 °С частота холостого хода постепенно снижается до 2400 мин⁻¹ и принимает волнообразный характер со снижением до 2150 и набором до 2400 мин⁻¹, в то время как при t_{oc} минус 50 °С дизель устойчиво продолжает работу на фиксированной частоте 2600 мин⁻¹.

Пуск дизеля при температуре окружающей среды минус 68 °С представляет особый интерес. Дизель запускается с 6 – 8 попытки с предварительно прогретым воздухом на впуске до плюс 35 °С и в течении 5 – 7 секунд после отключения стартера выходит на частоту фиксированных оборотов 2600 мин⁻¹. Через 3 – 5 секунд работы дизеля, на частоте фиксированных оборотов, средняя частота вращения коленчатого вала снижается. Далее наблюдается самостоятельная работа на топливе в сопровождении работы устройства ПВВ и свечи накаливания. По прошествии 2 – х минут, температура впускного воздуха падает до минус 27 °С, при этом частота оборотов дизеля снижается до 1200 мин⁻¹. Дальнейшая работа дизеля, не смотря на сопровождение постоянной работой ПВВ, имеет волнообразный характер с ростом частоты вращения коленчатого вала до 1800 мин⁻¹ и последующим затуханием до 1200 мин⁻¹. Температура впускного воздуха при этом находится в интервале от минус 27 °С до минус 22 °С. При отключении ПВВ дизель резко снижает обороты до полной остановки. При повторных запусках с включенным ПВВ дизель без затруднений в течении 1-2 секунд выходит на частоту фиксированных оборотов 2600 мин⁻¹. По прошествии 3-5 сек. работа дизеля принимает ранее описанный характер.

Не смотря на положительный результат при температуре окружающей среды минус 68 °С, пуск дизеля носит не удовлетворительный характер из-за значительных предварительных стартерных попыток, вызванных недостаточным прогревом подаваемого впускного воздуха.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

– для гарантированного пуска одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением объемом 650 см³, оснащенного свечей накаливания и подогревателем

масла в картере, в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С, определена минимальная температура подаваемого принудительно в цилиндр дизеля впускного воздуха, которая составляет 80 ± 5 °С.

Под гарантированным пуском в условиях арктических температур окружающей среды, следует понимать неустановившейся режим работы двигателя, характеризующий процесс раскрутки его вала стартером от неподвижного состояния до пусковой частоты вращения с последующим выходом на фиксируемую частоту холостого хода самостоятельной, непрерывной работой двигателя на топливе, за количество включений электростартера (попыток пуска) не более 6 и временем от начала первого включения стартера до непрерывной работы на топливе не более 5-ти минут.

– с целью повышения качества прогрева впускного воздуха, сокращения времени пуска и пусковых попыток, в первые секунды пуска при частоте оборотов дизеля до 130 мин^{-1} , целесообразно повышать температуру выше 170 °С, необходимой для устойчивой раскрутки дизеля. Для этой цели можно использовать более мощный (с запасом) нагревательный элемент. При повышении пусковой частоты до 130 мин^{-1} и выше необходимо снижение температуры впускного воздуха не ниже плюс 80 °С.

– принудительная рециркуляция с последующей подачей предварительного прогретого впускного воздуха позволяет снизить мощность нагревательного элемента ПВВ.

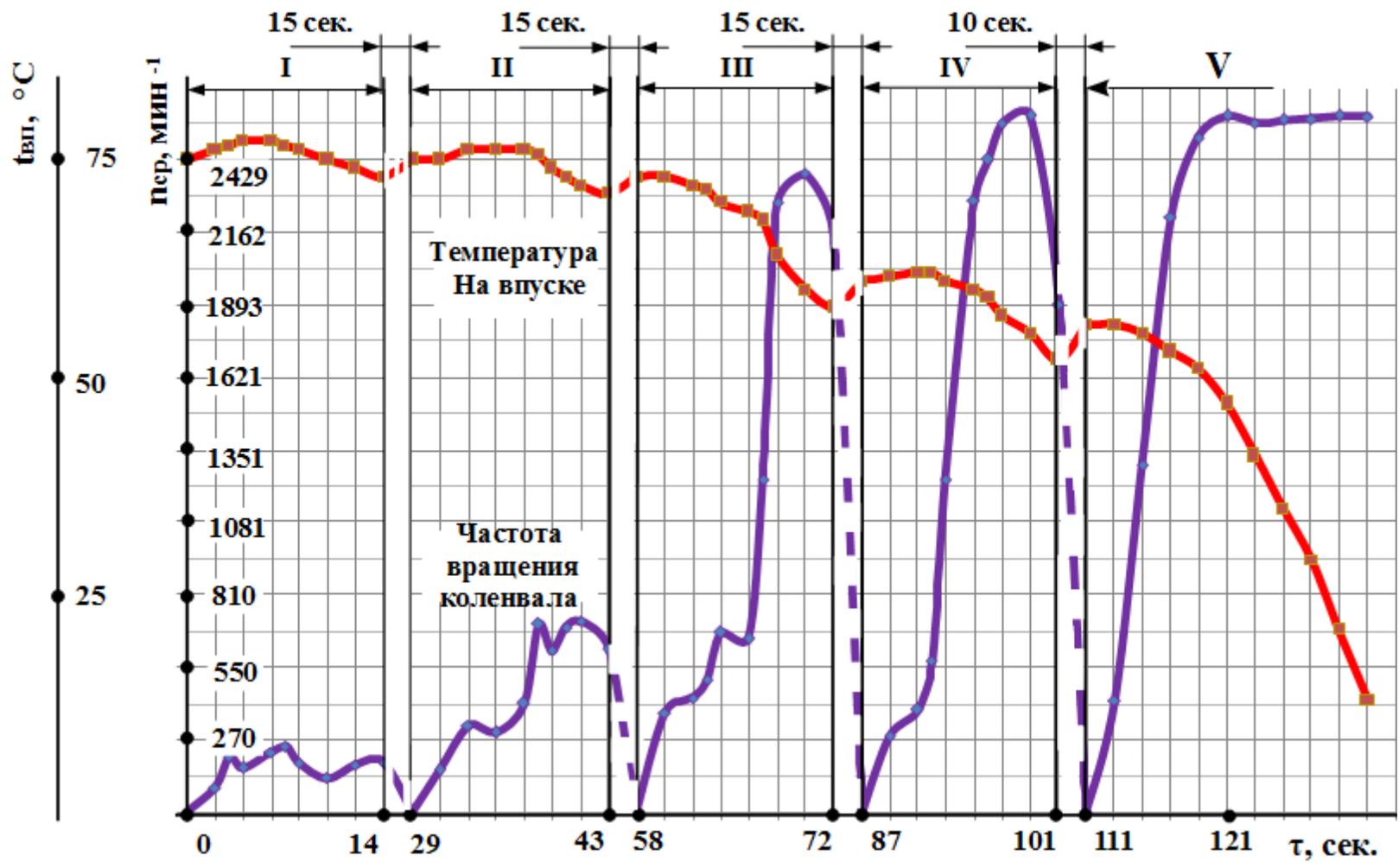


Рисунок 4.9 – Пуск дизеля с опытным образцом ПВВ при температуре окружающей среды минус 50 °С

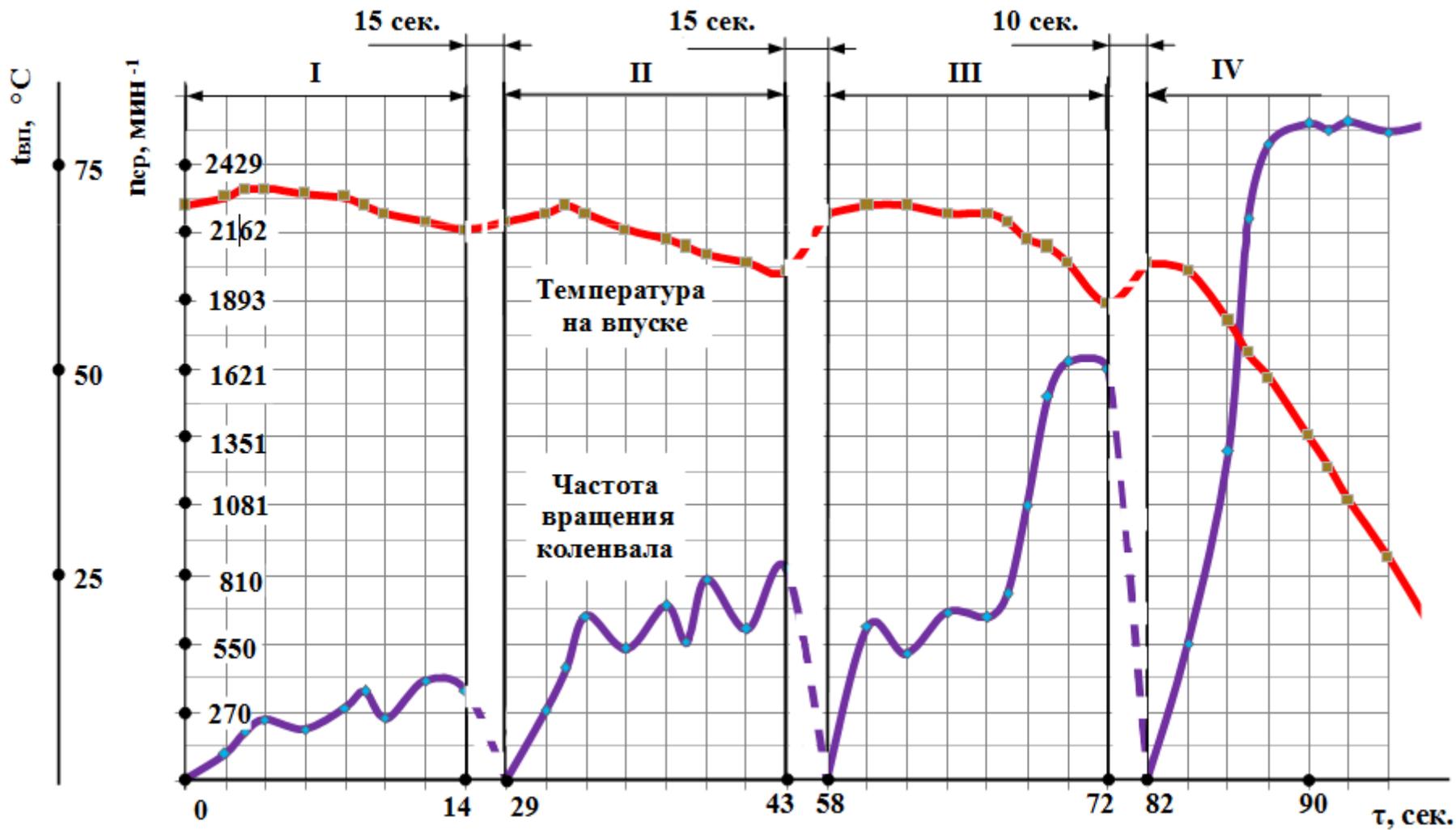


Рисунок 4.10 – Пуск дизеля с макетным образцом ПВВ при температуре окружающей среды минус 60 °С.

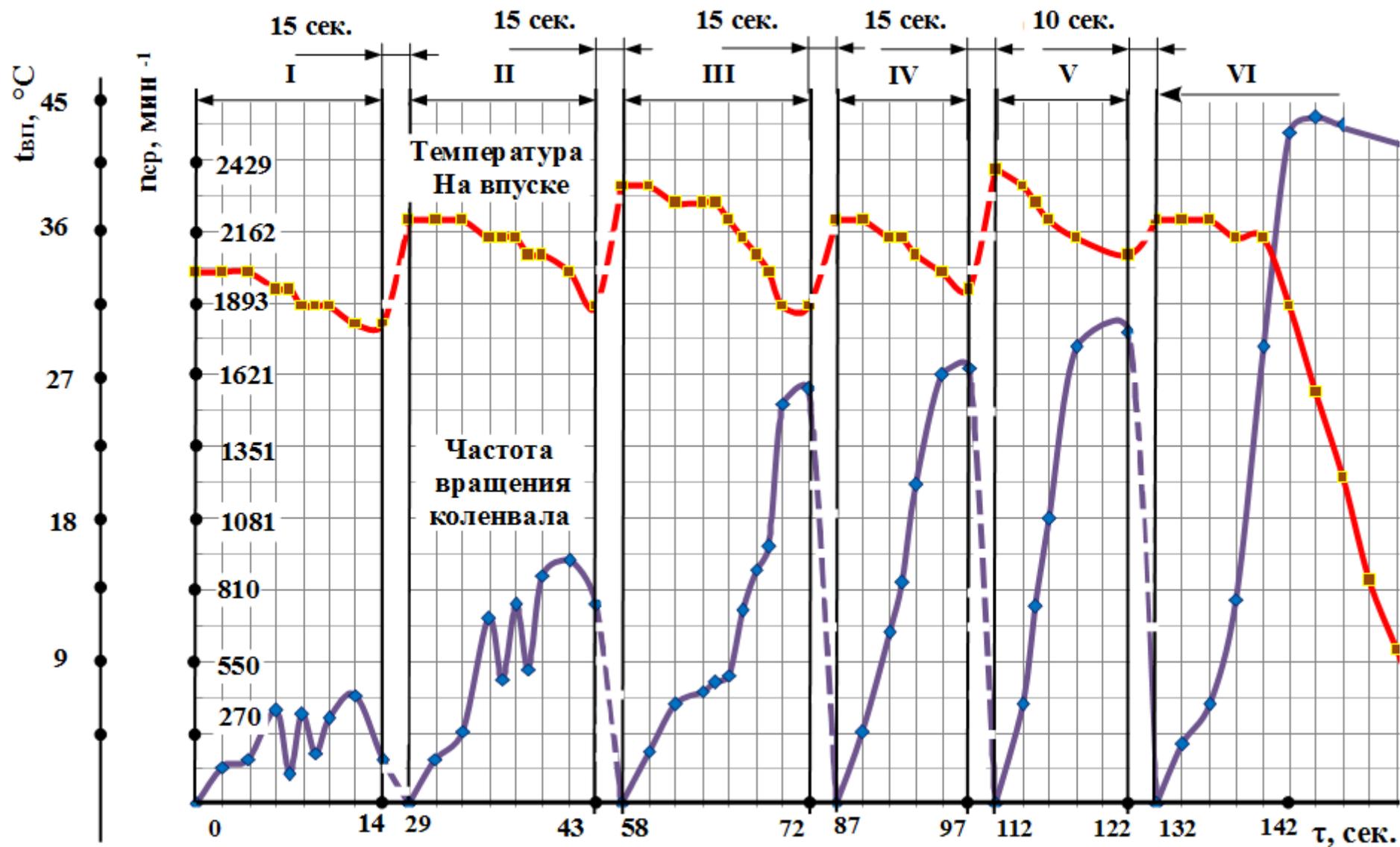


Рис. 4.11 – Пуск дизеля с макетным образцом ПВВ при температуре окружающей среды минус 68°C .

4.5 Разработка рекомендаций для пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С

По результатам проведенных исследований, на основе методики пуска рассматриваемого дизеля [78], составлены рекомендации пуска для малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических температур окружающей среды.

Данные рекомендации справедливы для дизеля оснащенного предпусковым подогревателем масла (Приложение 3), свечей накаливания (Приложение 5) и подогревателем впускного воздуха, конструкция которого представлена в п. 4.4.1.

Условием пуска так же будет являться состояние применяемого топлива. Необходимо что бы топливо сохраняло свою текучесть. Это может быть достигнуто путем предварительного прогрева топлива, либо путем разжижения топлива керосином ТС-1 (рисунок. 2.2).

Перед пуском дизеля необходимо провести разжижение моторного масла бензином. Для этого залить в картер дизеля 400 грамм бензина, запустить дизель на 3 – 5 минут для перемешивания масла в картере с бензином, с целью заполнения системы смазки и масляных каналов КШМ дизеля разжиженным маслом.

Перед пуском провести следующие операции:

1. Прогреть масло в картере дизеля, для чего включить предпусковой подогреватель масла не менее чем на 40 минут.

2. Прогреть систему впуска дизеля и камеру сгорания (по возможности), для чего по истечению 30 минут после включения подогревателя масла, включить нагревательный элемент ПВВ и через 5 секунд после включения нагревательного элемента ПВВ включить электрический вентилятор ПВВ.

3. По истечении 8 минут не выключая ПВВ и подогреватель масла включить свечу накаливания на 1 минуту.

4. По истечении 1 минуты после включения свечи, провести пуск дизеля электростартером. Электростартер допускается включать на 10 – 15 секунд.

Для исключения выхода из строя свечи накаливания, необходимо ее периодическое отключение.

Если дизель не запустился с первой попытки, повторить попытку через 15 секунд при этом все средства облегчения пуска не отключать.

Продолжать попытки с интервалом 15 секунд до запуска дизеля. При появлении устойчивых вспышек допускается отключение подогревателя масла и свечи накаливания. ПВВ не отключается до достижения дизелем устойчивых оборотов на режиме нагрузки.

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Определена средняя температура в камере сгорания дизеля прокручивании коленчатого вала дизеля электростартером в условиях температуры окружающего воздуха от минус 20°C до минус 60°C.

2. Установлены закономерности прогрева камеры сгорания при принудительной подачи на впуск предварительно разогретого воздушного заряда, для температур окружающей среды минус 20 °С, минус 40 °С и минус 60 °С.

3. Осуществлен надежный пуск дизеля в условиях арктических температурах окружающей среды до минус 60±1 °С.

4. Экспериментально установлена максимальная температура, непрерывно подаваемого принудительно, впускного воздуха, при которой пуск дизеля возможен в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60±1 °С, которая составляет плюс 170±5 °С. Средняя частота вращения коленчатого вала при этом 130 – 140 мин⁻¹.

5. Достигнут и неоднократно воспроизведен гарантированный пуск дизеля в условиях арктических температурах окружающей среды. Экспериментально определена минимальная температура подаваемого принудительно впускного воздуха, при которой возможен гарантированный пуск одноцилиндрового дизеля

с воздушным охлаждением объемом 650 см^3 в условиях арктических температур окружающей среды до минус $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, которая составляет $80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Средняя пусковая частота при этом должна составить не менее $130 - 140 \text{ мин}^{-1}$.

6. Представленный способ пуска и конструкция опытного образца подогревателя впускного воздуха показали высокую эффективность работы в условиях арктических температур окружающей среды до минус $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, определяемую количеством попыток и общим временем пуска с момента начала включения стартера до выхода дизеля на фиксированную частоту оборотов холостого хода.

7. Установлена минимальная мощность нагревательного элемента предлагаемого устройства ПВВ для рассматриваемого дизеля, которая составляет $250 \pm 50 \text{ Вт}$.

Полученные результаты, могут быть распространены на дизели подобного класса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Актуальность применения отечественных малоразмерных дизелей с воздушным охлаждением в составе силовых агрегатов для освоения Арктической зоны обозначила первостепенную задачу, связанную с пуском дизеля в суровых климатических условиях, характеризующимися температурами окружающей среды до минус 60 °С. Обзор состояния проблемы пуска и анализ систем предпусковой/пусковой подготовки позволил выделить в качестве наиболее эффективного способа пуска – принудительную подачу в цилиндр дизеля предварительно разогретого воздушного заряда.

2. Разработана математическая модель пускового режима и работы дизеля 1С9,5/8,0, в условиях отрицательных температур окружающей среды. Проведенные исследования позволили оценить адекватность проводимых расчетов и установить диапазон температуры впускного воздуха для предлагаемого способа, при котором возможен гарантированный пуск дизеля в условиях арктических температур до минус 60 °С.

3. Разработано и апробировано расчетами программное обеспечение исследования процессов предпусковой подготовки и пуска дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды.

4. Установлены закономерности влияния температуры воздуха на впуске, эквивалентной площади утечек в ЦПГ, средней пусковой частоты на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания дизеля типа 1С9,5/8,0 в условиях температур окружающей среды до минус 60 °С. Определена минимальная температура подаваемого принудительно впускного воздуха, при которой возможен гарантированный пуск одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением объемом 650 см³ в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С, которая составляет 80 °С при средней пусковой частоте не менее 130 – 140 мин⁻¹.

5. Разработано устройство подогрева и принудительной подачи воздуха, обеспечивающее пуск дизеля 1С9,5/8,0 во всем диапазоне отрицательных темпе-

ратур до минус 60 °С. При этом достигнут и неоднократно воспроизведен гарантированный пуск дизеля в условиях арктических температурах окружающей среды. Доказана эффективность работы разработанного устройства в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С, определяемая количеством включения электростартера (попыток пуска) и общим временем пуска с момента начала включения стартера до выхода дизеля на фиксированную частоту оборотов холостого хода.

6. Повышены пусковые качества для дизельного двигателя 1Ч9,5/8,0 снижением минимальной температуры пуска до минус 60 °С. При этом максимальное количество включений электростартера (попыток пуска) не более 6-ти и время от начала первого включения стартера до непрерывной работы на топливе не более 5-ти минут.

7. Сформулированы рекомендации для гарантированного автономного пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды до минус 60 °С. Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты, возможно, распространить на дизели подобного класса, а так же на дизели с меньшим рабочим объемом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агуреев И.Е. Нелинейные динамические модели поршневых двигателей внутреннего сгорания: Синергетический подход к построению и анализу: монография / И.Е. Агуреев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. – 224 с.
2. Авдеев К.А., Агуреев И.Е., Хмелев Р.Н. Об учёте особенностей процесса тепловыделения в динамической модели дизельного двигателя / К.А. Авдеев, Агуреев, Р.Н. Хмелев // Двигатель – 2010: Материалы МНТК, Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.– С. 41- 45.
3. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей: учебник для ВУЗов.– М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2007.– 336 с.
4. Аюгин Н.П., Халимов Р.Ш., Молочников Д.С., Богданов И.И. К вопросу исследования сгорания дизельного топлива в условиях низких температур/ Аюгин Н.П. и др. // Наука в центре России.– 2019.–№3(39).– С. 83- 91.
5. Агафонов А.Н., Замуков В.В., Терехин А.Н. Методы расчета рабочего процесса дизеля анаэробной энергетической установки / А.Н. Агафонов, В.В. Замуков, А.Н. Терехин // Судостроение.– 2006.– № 2.– С. 36 - 39.
6. Боровиков В.Ф. Расчетная оценка возможности пуска тракторного дизеля и эффективность облегчения пуска подогревом впускного воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– СПб., 1993.– 21 с.
7. Бондарь В.Н. Оценка влияния различных методов предпусковой подготовки тракторного дизеля на его пусковые характеристики./ В.Н. Бондарь // Тракторы и сельхоз машины.– Москва: 2017.– №2.– С. 42 - 46.
8. Бондарь В.Н. Оценка пусковых характеристик дизелей размерности 13/14 с индивидуальными головками цилиндров./ В.Н. Бондарь // АПК РОССИИ.– Троицк: Южно-уральский государственный аграрный университет, 2017.– том 2.– №2.– С. 397 - 401.
9. Бондарь В.Н. Математическая модель рабочего процесса дизельного двигателя на режимах пуска./ А.Н. Бондарь // Вестник Сибирской государ-

ственной автомобильно-дорожной академии.– Омск: СибАДИ, 2016.– №1(47).– С. 81 - 86.

10. Бондарь В.Н., Малоземов А.А., Кукис В.С. Математическая модель и программное обеспечение для имитационного моделирования дизеля на режимах предпусковой подготовки и пуска / В.Н. Бондарь, А.А. Малоземов, В.С. Кукис // Научноград.– 2017.– №(12).– С. 54 - 62.

11. Белокопытов С.В. Влияние отрицательных температур на процессы в смазочных системах поршневых двигателей наземного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Хабаровск, 2017.– 16 с.

12. Бабич А.А., Громов С.А. Современные методы математического моделирования рабочих процессов./ А.А. Бабич, С.А. Громов // Вестник ХНАДУ.– 2016.– №75.– С.109 - 115.

13. Бабичев А.А., Смолин А.А. Мероприятия по улучшению пуска поршневого двигателя при низких температурах / А.А. Бабичев, А.А. Смолин // Архитектура. Строительство. Транспорт. Инновации: материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ».– Омск: 2013.– С. 26 - 29.

14. Васильев А.В. Математическое моделирование рабочих процессов ДВС: учебное пособие / А.В. Васильев, Е.А. Григорьев.– Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. техн. ун – та., 2002.– 67 с.

15. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя / И.И. Вибе.– М.: Машгиз, 1962.– 271 с.

16. Гаврилов А.А., Игнатов М.С., Эфрос В.В. Расчет циклов поршневых двигателей: Учебное пособие / А.А. Гаврилов, М.С. Игнатов, В.В. Эфрос.– Владимир: ВлГУ, 2003.– 124 с.

17. Гуреев А.А. Топлива, смазочные материалы и жидкости для эксплуатации автомобилей и тракторов в северных районах / А. А. Гуреев, Ю. В. Микулин, В. В. Сеницын и др.; Под ред. проф. А. А. Гуреева.– Москва: Химия, 1976.– 181 с.

18. Грехов Л.В., Иващенко Н.А. Машиностроение. Энциклопедия. / Редакционный совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Двигатели внутреннего

сгорания. Т. IV–14 / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; Под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. 2013. – 784 с.

19. Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., и др. Физико–химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник / Н.Ф. Дубовкин, В.Г. Маланичева.– Москва, 1985г.

20. Елагин М.Ю. Математическое моделирование нестационарных процессов в открытых термодинамических системах / М.Ю. Елагин.– Тула: ТулГУ, 1999. – 112 с.

21. Елагин М.Ю. Термодинамика открытых систем. Практическое применение /М.Ю Елагин Тула: Изд – во ТулГ, 2020.– 482 с.

22. Елагин М.Ю., Павлов Д.В., Хмелев Р.Н. Разработка и апробация математической модели предпускового режима работы дизеля при низких температурах окружающей среды / М.Ю. Елагин, Д.В. Павлов, Р.Н. Хмелев // Известия МГТУ МАМИ: 2020.– №2(44) – С. 78 - 84.

23. Еникеев Р.Д., Рудной Б.П. Двигатели внутреннего сгорания. Основные термины и русско-английские соответствия: учебное пособие / Р.Д. Еникеев., Б.П. Рудной.– М.: Машиностроение, 2004.– 384 с.

24. Журавский Б.В., Занин А.В., Квасов И.Н. Моделирование электро-стартерной системы пуска двигателя внутреннего сгорания для исследования влияния на ее работу предпускового разряда аккумуляторной батареи / Б.В. Журавский, А.В. Занин, И.Н. Квасов // Динамика систем, механизмов и машин.– 2019.–Том 7.– № 2.– С. 24 - 32.

25. Игнатов М.С. Исследование и совершенствование рабочего процесса малоразмерного дизеля с неразделенной камерой сгорания: дис...канд. техн. наук.– Владимир, 2001.– 148с.

26. Иванов А.С., Анисимов В.А., Чикишев Е.М. Обеспечение оптимальной температуры технических жидкостей в транспортных средствах в условиях низких температур./ А.С Иванов., В.А. Анисимов., Е.М Чикишев // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Международной научно-прак-

тической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 2 томах; Тюменский индустриальный университет.– Тюмень: 2015.– С. 235 - 240.

27. Ильчук И.А., Калинин Д.С., Трофимова Д.А. Обеспечение безопасного использования автомобиля в зимних условиях применением резервной системы пуска двигателя./И.А. Ильчук, Д.С. Калинин, Д.А. Трофимова // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XV межвузовской научно-технической конференции.– Рязань: 2017.– С. 174 – 177.

28. Каллимуллин Р.Ф. Эффективность предпускового подогрева автомобильного двигателя./ Р.Ф. Каллимуллин // Вестник СИБАДИ.– 2015.– № 1(41).– С. 11 - 16.

29. Калинин В.Ф., Щегальков А.В. Математическое моделирование совместных режимов работы средств терморегулирования топлива и питающего воздуха в дизельных двигателях / В.Ф. Калинин, А.В. Щегальков // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В.И. Вернадского.– 2010.– №1-3(28).– С. 23-27.

30. Карташевич А.Н. Улучшение пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации: Монография / А.Н. Карташевич, Г.М. Кухаренок, А.В. Гордеенко, Д.С. Разинкевич. Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. – Минск.: Изд. ООО «Красико-Принт», 2005, – 180 С.

31. Крохта Г.М. Особенности холодного пуска двигателя 6ЧН 13/11 и послепускового прогрева моторно-трансмиссионной установки трактора Т-150К. / Г.М. Крохта // Тракторы и сельхоз машины.– Москва: 2016.– №1.– 31– 35 с.

32. Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А. Особенности прогрева двигателя внутреннего сгорания после холодного пуска /Г.М. Крохта, Е.Н. Хомченко, Н.А. Усатых // Двигателестроение.– 2021.– № 3.– С. 28 - 34.

33. Кубланов М.С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Часть I. Моделирование систем и процессов./ М.С. Кубланов // Издание третье, переработанное и дополненное: Учебное пособие.– М.: МГТУ ГА, 2004.– 108 с.

34. Козлов А.А. К вопросу о повышении эффективности пуска дизеля. / А.А. Козлов // Вестник СибАДИ.– Омск: СибАДИ, 2018.– №5.– Том 15.– С. 650 - 659.
35. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р.З. Кавтарадзе.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.– 720 с.
36. Куценко А.С. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания на ЭВМ / Куценко А.С.– Наукова думка, 1988.– 104с.
37. Клиначев Н.В., Воронин С.Г., Согрин А.И. и др. Моделирование процесса пуска двигателя внутреннего сгорания электрическим стартером / Н.В. Клиначев, С.Г. Воронин, А.И. Согрин и др.// Вестник ЮурГУ.– 2015.– Т 15, № 2.– С. 49 - 56.
38. Квайт С.М. Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей / С.М. Квайт, Я.А. Менделевич, Ю.П. Чижков. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 С.
39. Малиованов М.В. Динамическая теория ДВС (целесообразность создания и этапы разработки) / М.В. Малиованов // Изв. ТулГУ, Сер. «Автомобильный транспорт». - Тула: Изд-во ТулГУ, 1998.– Вып. 2.– С. 189 - 196.
40. Малиованов М.В. Программный комплекс системного моделирования переходных и установившихся режимов работы поршневых двигателей внутреннего сгорания / М.В. Малиованов, А.А. Плешанов, Э.С. Темнов, Р.Н. Хмелев // Свидетельство о регистрации электронного ресурса в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» Института научной информации и мониторинга Российской академии образования № 16505 от 13 октября 2010 г.
41. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы / М.А. Мамонтов. – Тула: Приокское книжное изд., 1970.– 87 с.
42. Манзин Н.Ю. К вопросу обеспечения надежного пуска дизельных двигателей в условиях низких температур./ Н.Ю. Манзин А.А. Заикин, С.В.

Рослов, В.В. Иванов // Вестник Сибирского Государственного Автомобильно-дорожного Университета.– Омск: СибАДИ, 2017.– №3(55).– С 88 – 94.

43. Мерданов Ш.М., Эртман С.А., Токарева Г.Н. и др. Математические модели исследования влияния низких температур окружающего воздуха и скорости ветра на температурный режим двигателей строительных и дорожных машин. / Ш.М. Мерданов, С.А. Эртман, Г.Н. Токарева и др. // Материалы международной научно–технической конференции: Наземные транспортно-технологические комплексы и средства.– 2015.– С. 210 - 216.

44. Мотыченков Л.А. Математическая модель для расчёта утечек через поршневые кольца / Л.А. Мотыченков // Молодой ученый. 2016.– № 9. С. 217 - 224.

45. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях / В.С. Найман – М.: Моск. типография Астрель, 2007.

46. Новопашин Л.А. Исследование пусковых свойств дизелей лесотранспортных машин при отрицательных температурах: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Екатеринбург, 2006.

47. Новопашин Л.А., Денешко Л.В., Кочетков П.В. Комплексный разогрев дизельного двигателя./ Л.А. Новопашин, Л.В. Денешко, П.В. Кочетков // Аграрный вестник Урала.– Екатеринбург: 2015.– №7(137).– С. 48 - 50.

48. Новопашин Л.А., Денешко Л.В., Кочетков П.В. Мобильное устройство облегчения пуска автотракторных дизелей./ Л.А. Новопашин, Л.В. Денешко, П.В. Кочетков // Аграрный вестник Урала.– Екатеринбург: 2014.– №12(130).– С. 42 - 44.

49. Никитин А.В, Савочкин А.А. Математическая модель определения параметров системы непрерывного поддержания температуры масла ходового двигателя./ А.В. Никитин, А.А. Савочкин // Известия института инженерной физики, Филиал ВА РВСН им. Петра Великого, Серпухов, 2018.– №1(47).– С. 26-31.

50. Оберемок В.З., Юрковский И.М. Пуск автомобильных двигателей / В.З.Оберемок, И.М. Юрковский.– М.: Транспорт, 1979. – 118 с.

51. Обухов С.Г. Математическое моделирование в системах электро-снабжения: учебное пособие / С.Г. Обухов // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014.– 84 с.

52. Овчинников А.И. Математическое моделирование процесса подогрева масла в двигателе внутреннего сгорания потоком воздуха через патрубок конечного радиуса./ А.И. Овчинников , А.Г. Белых, Ю.Е. Грядунова, Д.П. Понсанчуков.// Воздушно-космические силы теория и практика.– Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2018.– №6(6).– С 94 - 101.

53. Патрахальцев, Н.Н. Повышение эффективности холодного пуска дизеля / Н.Н. Патрахальцев, А.В. Фомин, Д.Х. Валеев и др. // Двигателестроение, 1995.– №2.– С. 79 - 80.

54. Павлов Д.В., Хмелев Р.Н. Особенности эксплуатации малоразмерных дизельных двигателей в условиях Арктики / Д.В. Павлов, Р.Н. Хмелев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования.– 2016.– Т. 3.– № 3 (6).– С. 241-247.

55. Павлов Д.В. Анализ систем облегчения пуска дизелей с воздушным охлаждением в условиях низких температур./ Д.В. Павлов // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 6 томах.– Курск, 2018.– С 101-111.

56. Павлов Д.В. Интегрированный подогреватель впускного воздуха для малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением./ Д.В. Павлов //Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием.– Курск:– Юго-Зап. гос. ун-т.– 2021.– С. 199-204.

57. Павлов Д.В. Пуск дизельного двигателя 1С9,5/8,0 путем принудительной подачи предварительно разогретого воздушного заряда./ Д.В.

Павлов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение: 2022.– №3(744).– С.

58. Павлов Д.В., Платонов К.Ю., Хмелев Р.Н. Математическое моделирование процесса функционирования одноцилиндрового дизеля с воздушного охлаждения с учетом расхода картерных газов / Д.В. Павлов, К.Ю. Платонов., Р.Н. Хмелев // Известия МГТУ МАМИ.– 2020.– №3(45).– С. 75 - 82.

59. Разлейцев Н.С. Моделирование и оптимизация процессов сгорания в дизелях / Н.С. Разлейцев.– Харьков, 1980.– 165 с.

60. Раков В.А., Сальников А.В. Уменьшение времени прогрева двигателя и отопления салона транспортного средства за счет использования теплоты отработавших газов./ В.А. Раков А.В. Сальников // Транспорт на альтернативном топливе.– 2016.– №5(41).– С. 36 - 43.

61. Резник А.М. Электрооборудование автомобилей: учебник для автотранспортных техникумов / А.М. Резник.– М.: Транспорт, 1990.– 256 с.

62. Сансиев В.Г. Задачи по гидравлике с решениями (основные физические свойства жидкостей и газов): метод. указания. – Ухта : УГТУ, 2009. – 24 с.

63. Сулейменов Т.Б., Балабаев О.Т., Саржанов Д.К., Абенов Е.С., Жакупов Т.М. Совершенствование системы подогрева масла в картере ДВС // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований № 9, 2015. – С. 28-30.

64. Тышкевич Л.Н., Журавский Б.В. Повышение эффективности эксплуатации транспортных машин в условиях низких отрицательных температур./ Л.Н. Тышкевич, Б.В. Журавский // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.– Омск: СибАДИ, 2016.– №3(49).– С. 36 – 41.

65. Хмелев Р.Н. Математическое и программное обеспечение системного подхода к исследованию и расчету поршневых двигателей внутреннего сгорания; под ред. Р.Н. Хмелева: монография / Р.Н. Хмелев.– Тула: – ТулГУ, 2011.– 229 с.

66. Харитонов В.В. Повышение эффективности пуска автотракторного дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– М.: РУДН, 2005.– 24 с.
67. Чудов В.И. Оценка пусковых качеств автомобильных двигателей./ В.И. Чудов // Научные чтения: Сборник материалов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2008 году.– Сыктывкар: Издательство Сыктывкарский лесной институт – филиал государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия имени С. М. Кирова", 2009.– С.440 - 442.
68. Чижков Ю.П., Квайт С.М., Сметнев Н.Н.. Электростартерный пуск автотракторных двигателей / Ю.П. Чижков, С.М. Квайт, Н.Н. Сметнев.– М.: Машиностроение, 1985.
69. Шавлов А.В. Улучшение пусковых характеристик дизелей типа В-2 с комбинированной системой подготовки запуска совершенствованием системы термостатирования масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Барнаул, 2012.– 16 с.
70. Шароглазов Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев.- Челябинск: Изд-во: ЮУрГУ, 2004.– 344 с.
71. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев.– Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с.
72. Шишков В.В. Улучшение показателей рабочего цикла дизеля при пуске подогревом впускного заряда: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Челябинск 2000.– 20 с.

73. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1967.– 299 с.
74. ГОСТ 1666 - 42 и ГОСТ 1666–51 Соляровое масло [Текст].
75. ГОСТ 54120 - 2010 Двигатели автомобильные. Пусковые качества. Технические требования [Текст] Введ.– 2011—09—01.– М: Изд–во Стандартиформ, 2011.
76. Дизели ТМЗ-650Д. Программа и методика испытаний. 045 410 000 ПМ. Тула: АО АК «Туламашзавод». – 41 с.
77. Дизели ТМЗ-520Д. Руководство по эксплуатации 048 110 000 РЭ. – Тула: АО «АК «Туламашзавод». – 80 С.
78. Дизель–генераторная установка ДГУ8-П27,5-ВМ2. Руководство по эксплуатации 045 500 000 РЭ.– Тула: АО «АК «Туламашзавод».– 94 с.
79. Инструкция по эксплуатации UNI–Т. Цифровые запоминающие осциллографы серийUTD2025/3025. [Электронный ресурс]: 10utd2025c-manual.pdf. – Режим доступа: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1653427577&tld=ru&lang=ru&name=10utd2025c-manual.pdf>
80. Как проверить датчик коленвала ЗМЗ 406: распиновка, схема, принцип работы. [Электронный ресурс]: Портал avtolev.ru – автозапчасти: [Сайт].– Режим доступа: <https://avtolev.ru>
81. Насос топливный 700.1111010. Технические условия. ТУ 4571-023-10025521-2005[Текст] .– ЗАО «АЗПИ».– 2005 г.
82. ОСТ ВЗ-2133-88 Дизели военных гусеничных машин. Метод определения и оценки пусковых качеств на стенде [Текст].
83. Плоские нагреватели [Электронный ресурс]: Промнагрев. Разработка и производство: [Сайт].– Режим доступа: <https://www.promnagrev.ru/ploskie-nagrevatelnye-elementy>
[utm_source=yandex&utm_medium=ppc&&utm_campaign=Ploskie&yclid=5719283172276490434](https://www.promnagrev.ru/ploskie-nagrevatelnye-elementy)
84. Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2020 г. N 616 «Об установлении запрета на допуск промышленных товаров, происходящих из

иностранных государств, для целей осуществления закупок для государственных и муниципальных нужд, а также промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, работ (услуг), выполняемых (оказываемых) иностранными лицами, для целей осуществления закупок для нужд обороны страны и безопасности государства». [Электронный ресурс]: Гарант.ру информационно правовой портал: [Сайт].– Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73879185/>.

85. Патент Р.Ф. 2525778С2 Российская Федерация. МПК F02M19/04. Способ пуска двигателя внутреннего сгорания при низких температурах и устройство для его осуществления: заявл. 15.10.2012 опубл. 20.08.2014 / Болштянский А.П., Щерба В.Е., Болштянский А.А.; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет».

86. Патент Р.Ф. 2595294С2 Российская Федерация. МПК F02M35/10. Способ подогрева впускного воздуха в двигателе внутреннего сгорания и двигатель внутреннего сгорания для осуществления способа: заявл. 16.05.2012 опубл. 27.08.2016 / Вигилд К.В., Кюске А., Ретгер Д.; патентообладатель Форд Глобал Технолоджис, ЛЛК (US).

87. Патент Р.Ф. 2395707С2 Российская Федерация. МПК F02M31/00. Способ подогрева всасываемого воздуха в двигателях внутреннего сгорания: заявл. 21.02.07 опубл. 27.07.10 / Еремин Б.Г. и др.; патентообладатель МОУ «Институт инженерной физики».

88. Патент Р.Ф. 150179U1 Российская Федерация. МПК F02N19/00. Устройство для облегченного пуска силовой установки: заявл. 10.09.14 опубл. 10.02.15 / Жуков Л.В., Кравченко И.Н., Ивановский В.С.; патентообладатель ФГБВОУ ВПО «Военно-технический университет» Министерства обороны Российской Федерации.

89. Патент Р.Ф. 152094U1 Российская Федерация. МПК F02N19/00. Система впуска двигателя внутреннего сгорания: заявл. 23.07.13 опубл. 10.05.15 / Карнаухова И.В.; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый технический университет».

90. Патент Р.Ф. 192116U1 Индукционный подогреватель впускного воздуха дизеля типа В-2: заявл. 14.02.19 опубл. 04.09.19 / Козлов А.А. и др.; патентообладатель Козлов А.А. и др.

91. Патент Р.Ф. 184938U1 Российская Федерация. МПК F02M31/13. Устройство для подогрева воздуха в двигателе внутреннего сгорания: заявл. 10.04.18 опубл. 14.11.18 / Литвинов Р.С. и др.; патентообладатель ФГКВОУ ВО МО РФ.

92. Патент Р.Ф. 96188U1 Российская Федерация. МПК F02M31/13. Устройство для подогрева воздуха: заявл. 22.01.10 опубл. 20.07.10 / Назаров А.В. и др.; патентообладатель Серпуховской военный институт ракетных войск.

93. Патент Р.Ф. 2696524C2 Российская Федерация. МПК F02M31/125. Устройство для обеспечения работоспособности системы подогрева впускного воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя силовой установки военных гусеничных машин в условиях низких температур: заявл. 18.11.16 опубл. 02.08.19 / Москалев В.С. Корольков А.И. Трофимов И.А. патентообладатель ФГКВОУ ВО ВУНЦ СВ «Общевойсковая академия ВС РФ».

94. Патент Р.Ф. 139004U1 Российская Федерация. МПК F02N19/04. Устройство для предпускового подогрева газовых двигателей внутреннего сгорания: заявл. 04.07.13 опубл. 27.03.14 / Пенкин А.Л., Капустин А.А., Тишенин А.М.; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

95. Патент Р.Ф. 112869U1 Российская Федерация. МПК B60K13/00. Система подогрева впускного воздуха и охлаждения выхлопных газов: заявл. 02.06.11 опубл. 27.01.12 / Персифулл Р.Д., Леоне Т.Г.; патентообладатель Форд Глобал Технолоджис, ЛЛК (US).

96. Патент Р.Ф. 2295055C1 Российская Федерация. МПК F02N19/06. Устройство облегчающее пуск дизельного двигателя в условиях низких температур: заявл. 02.06.11 опубл. 27.01.12 / Родин С.В. и др.; патентообладатель Родин С.В., Савельев М.А., Шапран В.Н.

97. Патент Р.Ф. 111203U1 Российская Федерация. МПК F02N17/02. Система подогрева воздуха и газа, поступающих в двигатель внутреннего сгорания: заявл. 10.01.06 опубл. 10.03.07 / Цапков В.И.; патентообладатель Цапков В.И.

98. Протокол № 14. Испытания на продолжительность пуска при температуре окружающей среды минус 20°C и минус 40°C. – Тула: АО «АК «Туламашзавод», 2006 – 1 С.

99. Протокол № 17 испытаний ДГУ8-П27,5-ВМ1 при температуре окружающей среды минус 40°C и минус 50°C.– Тула: АО «АК «Туламашзавод», 2016 - 1 С.

100. 45. Протокол № 18. Определение времени продолжительности пуска. – Тула: АО «АК «Туламашзавод», 2016 – 1 С.

101. 44. Протокол № 25. Определение времени продолжительности пуска при температуре окружающей среды минус 50°C. – Тула: АО «АК «Туламашзавод», 2006 – 1 С.

102. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661037 Российская федерация, Динамическая модель быстроходного дизеля с воздушным охлаждением [Текст]/ Павлов Д.В., Платонов К.Ю., Хмелев Р.Н. 17.09.2020 г.

103. Agureev I. Using experience of the dynamic models of piston internal combustion engines I Agureev, M Elagin, R Khmelev, K Platonov and V Pyshnyi. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 786, International Scientific Conference Interstroyemh – 2019 (ISM – 2019) 12-13 September 2019 (Эл. сборник), Kazan, 2019.

104. Bi X., Han S. A Multi-Zone Model for Prediction of DI Diesel Engine Combustion and Soot Emission // SAE Tech. Pap. Ser.– 1994.– N 941900.– P. 1-12.

105. Barba C., Burjhardt C., Boulouchos K., Bargende M. A phenomenological combustion model for heat release rate prediction in high-speed DI diesel engines with common rail injection / C. Barba, C. Burjhardt, K. Boulouchos, M. Bargende // SAE Technical Paper 2000– 01– 2933, 2000.

106. Bordet N., Caillol C., Higelin P., Talon V. A Physics and Tabulated Chemistry Based Compression Ignition Combustion Model: from Chemistry Limited to Mixing Limited Combustion Modes / N. Bordet, C. Caillol, P. Higelin, V. Talon // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles.– 2011.– Vol. 66, №. 5.– P. 823-843.
107. Chmela F., Engelmayer M., Pirker G., Wimmer G. Prediction of turbulence controlled combustion in diesel engines / F. Chmela, M. Engelmayer, G. Pirker, A.
108. Kobayashi A., End S., Someya T / Analysis of the combustion phenomena under the cold starting condition and improvement of cold startability by a programmed control system //SAE Paper. 1984. № 845013. P. 1112-1119.
109. Kreun, P.K. Simulation of an intake manifold pre-heater for cold diesel engine startup / P.K. Kreun // Master's Theses. Paper. – 2014. – № 475
110. Mitchell K. The cold performance of diesel engines / K. Mitchell // SAE. 1993. Paper 932768. P. 678-687.
111. Ramos J.I., Internal Combustion Engine Modeling /J. I. Ramos.– New York. : Hemisphere Publishing Corporation.– 1989.
112. Wiebe I.I. Brennverlauf und Kreisprozeß von Viebrennungsmotoren.– Berlin: Vebverlagtechnik, 1970.
113. Wimmer // THIESEL 2004 Conference on Thermo – and Fluid dynamic Processes in Diesel Engines, 2004.
114. Woschni G., Anisits F. Experimental Investigation and Mathematical presentation of Rate of Heat Release in Diesel Engines Dependent upon Engine Operating Conditions // SAE Tech. Pap. Ser.– 1974. – N 740086. – P. 1-18.
115. Xin, Q. Diesel engine system design / Q. Xin. – Woodhead Publishing Limited, 2011. – 1088 p.
116. A multi-Zone Model for Diesel Spray Combustion / Xiaoping Bi [et al.] // SAE Tech. Pap. Ser. – 1999. – N 1999-01-0916. – P. 1-10.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение № 1 Конструктивные и эксплуатационные параметры объекта исследования

Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Эффективная мощность, по ГОСТ 18509, кВт, не менее	Минимальная частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода, мин ⁻¹	Максимальная частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода, мин ⁻¹
3000±30	10,0	1000±100	3100+100
		3100+100 *	
3350±100	11,5	1000±100	3650+100
		3650+100 *	
3600 ⁺⁵⁰ ₋₁₀₀	12,0	1000±100	3700+200
* Для дизелей с жесткой фиксацией рычага подачи топлива			
Тип дизеля	четырёхтактный, с непосредственным впрыском		
Число цилиндров	1		
ТМЗ-650Д/30	под углом 30° к горизонтали		
ТМЗ-650Д/90	вертикальное		
Число клапанов на цилиндр	2		
Диаметр цилиндра, мм	95		
Ход поршня, мм	92		
Рабочий объем, см ³	652		

Направление вращения коленчатого вала	левое со стороны привода (против часовой стрелки)
Угол опережения впрыска	25°... 29°
Степень сжатия	19±1
Максимальный крутящий момент, по ГОСТ 18509, Н·м, не менее	35,0
Частота вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте, мин ⁻¹	2800±100
Применяемое топливо:	топливо дизельное по ГОСТ РВ 50920 группа 1.4.1; топливо дизельное по ГОСТ 305;
Количество масла, заливаемое в картер дизеля, л:	
- с наклонным расположением цилиндра	1,7±0,1
- с вертикальным расположением цилиндра	1,8±0,1
Удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме, по ГОСТ 18509, г/(кВт·ч), не более	300
Длительность непрерывной работы, ч	24 ^{+0,5}
Относительный расход масла на угар в процентах от расхода топлива, не более	0,85
Давление масла в системе смазки при температуре масла (80...95) °С, МПа (кгс/см ²):	
При частоте вращения коленчатого вала выше 3000 мин ⁻¹	0,35...0,6 (3,5...6,0)
При минимальной частоте вращения коленчатого вала на режиме холостого хода 1000±100 мин ⁻¹	не менее 0,02 (0,2)

Масса дизеля сухая, без навесного оборудования (глушителя, фильтра очистки воздуха, стартера, генератора), кг, не более	65
Габаритные размеры дизелей, мм, не более	
ТМЗ-650Д/90	465 x 420 x 586
ТМЗ-650Д/30	556 x 422 x 426
Система охлаждения	
Основная – воздушная, от центробежного вентилятора	
Дополнительная – система охлаждения масла системы смазки дизеля: блок распределительный с термосиловым датчиком; масляный радиатор	
Система смазки	комбинированная, под давлением от масляного насоса и разбрызгиванием
Имеется уравновешивающий вал	
Поршневые кольца	два компрессионных и одно маслосъемное
коренные подшипники коленчатого вала	скольжения, смазка под давлением
Насос топливный подкачивающий	двух видов: - мембранного типа; - электрический проточного типа с электроприводом 12 В (24 В)
Топливная аппаратура	
Топливный насос высокого давления	плунжерный, столбикового типа, встроенный в картер
Форсунка	соплового типа (5 сопел)

Регулятор частоты вращения	всережимный
Степень неравномерности регулятора по ГОСТ 18509, %, не более	8
Свеча накаливания (в головке цилиндра)	со спиралью в оболочке (12 В или 24 В)
Насос масляный системы смазки	шестеренчатый, односекционный
Датчик давления масла	электрический
Датчик температуры масла	двух видов: работающий в комплекте с указателем температуры; работающий в комплекте с контрольной лампой
Фильтр масляный	двух видов: - с бумажным фильтрующим элементом (одноцветным); - с фильтрующим элементом сетчатого типа (многоцветным)
Генератор (в исполнении дизеля с генератором)	встроенный в маховик, переменного тока с реле-регулятором напряжения. Двух видов: - 14 В, 28 А; - 28 В, 20 А
Пуск дизелей	
Электростартер	двух видов: с номинальным напряжением, 12 В; с номинальным напряжением, 24 В Направление вращения со стороны привода – левое.
Воздухофильтр	сухого типа, с бумажным фильтрующим эле-

	МЕНТОМ
Глушитель (искрогаситель)	с резонансной системой глушения
Фильтр топливный	с датчиком наличия воды в топливе и со встроенным подогревателем

Приложение № 2 Применяемое топливо и масла

1. Применяемое топливо:	топливо дизельное по ГОСТ РВ 50920 группа 1.4.1;
	топливо дизельное по ГОСТ 305; топливо дизельное ЕВРО по ГОСТ Р 52368 (ЕН590:2009)
Заменители:	топливо дизельное ДЛЭ, ДЗЭ по ТУ 38.001162
В экстренных случаях:	топливо для реактивных двигателей ТС-1, Т-2 ГОСТ 10227) Смесь топлив ТС-1, Т-2 ГОСТ 10227 с дизельным топливом)

Допускается применение других марок дизельного топлива отечественного и импортного производства.

Марки дизельного топлива, применяются в зависимости от температуры окружающего воздуха.

2. Масла и смазки

Масла, заливаемые в картер дизеля:

ВНИИНП М-5з/16Д₂ ТУ 38.401-58-309;

М-4з/14-Д ТУ 0253-006-08151164; М-12Г₂ ТУ 38.401-58-230;

ЛУКОЙЛ-СУПЕР SAE 20W40 CF-4/SG (БЕЛС НД экстра) ТУ 0253-075-00148636;
М14Г₂К ТУ 38.401-58-98 и другие моторные масла для дизелей отечественного и импортного производства группы не ниже В₂ ГОСТ 17479.1 (API CC) с вязкостью, соответствующей температуре окружающего воздуха.

Приложение №3 Технические характеристики подогревателя моторного масла в картере дизеля

Номинальное напряжение.....	24 В
Максимальное напряжение.....	28 В
Номинальная мощность на установившемся режиме при использовании масла М16ИХПЗ ГОСТ 25770 с температурой -20 °С и напряжении электропитания	
24 В.....	300±30 Вт
12 В.....	270±30 Вт
Максимальный пусковой ток.....	60 А в течение 3 сек.
Номинальное электрическое сопротивление при температуре	
20 °С.....	0,42 Ом
Средняя температура переключения	140 °С
Температура рабочей среды не более	120 °С



Рисунок П.1– Подогреватель масла (резистор)

Приложение 4 Технически характеристики подогревателя дизельного топлива

Номинальный расход топлива.....	40 л/ч
Перепад давления.....	0,22 МПа
Начальное гидравлическое сопротивление при номинальном расходе топлива.....	0,005 МПа
Напряжение питания подогревателя.....	12-24 В
Потребляемая подогревателем топлива электрическая мощность при расходе топлива 20 л/ч и температуре на входе -40°C при напряжении питания	
12 В.....	180 +10 и -30 Вт
24 В.....	200+20 и -30 Вт
Температура нагрева топлива подогревателем при номинальном напряжении и температуре на входе -40 °С.....	15 °С
Сопротивление электрической цепи подогревателя при температуре 20°C.....	0,7-1,2 Ом



Рисунок П.2 – Фильтр - подогреватель топлива

Приложение №5 Технические характеристики штифтовой свечи камеры сгорания

Напряжение питания свечи.....	12-24 В
Максимальная температура.....	$\geq 850^{\circ}\text{C}$
Потребляемая электрическая мощность	
12 В.....	105 Вт
24 В.....	132 Вт



Рисунок П.3 – Штифтовая свеча камеры сгорания

Приложение №6 Основные технические и конструктивные параметры климатической камеры КТВV 8000

1. Объем полезного пространства.....	8000 л.
2. Размеры полезного пространства:	
длина.....	2300 мм
ширина при круглом сечении.....	1870 мм
высота.....	1870 мм
3. Диапазон температур:	
минимальная	- 70°C
максимальная.....	300°C
4. Точность поддержания температуры.....	±2°C
5. Точность поддержания влажности.....	±3°C
6. Продолжительность охлаждения:	
от 20°C до -70°C.....	5час.
от 20°C до -65°C.....	4час.
7. Относительная влажность от 10% до 95% смотря на температуру в полезном пространстве.	
8. Окружающие условия:	
Испытательная климатическая камера предусмотрена для эксплуатации в местах с малыми колебаниями температуры, с низкой запыленностью воздуха без содержания агрессивных газов.	
Температура.....	от 18°C до 25°C
Относительная влажность.....	20% - 70%

Приложение №7 Результаты расчетов инерционности термопарных датчиков температуры

Расчет инерционности термопарных датчиков температуры проводился по формуле [73]:

$$\varepsilon_o = \frac{c}{\alpha S}$$

где $c = \sum_j c_j \rho_j V_j$ – полная теплоемкость системы тел, Дж/К;

S – поверхность теплообмена, м²;

α – коэффициент теплообмена между поверхностью термопары и средой, определяемый по критериальной зависимости, Вт/(м²·К);

c_j – удельная теплоемкость материала термопары, Дж/(кг·К) (таблица П7.1);

ρ_j – плотность материала термопары, кг/м³ (таблица П7.1);

V_j – объем материала термопары, м³.

Таблица П.7.1

Физические свойства материала термопары

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/ (кг·К)
Хром	7150	388
Никель	8900	427
Медь	8930	448

Для применяемых термопар ТД 701Е, ТД 714Е типа ХК – Хромель – Копель (Хром – Никель и Медь – Никель) диаметр равен 0,5.

Подставляя числовые значения в формулу (П 7.1), получим

$$D = 0,5 \text{ мм}, S = 4\pi R^2 = 4 \cdot 3,1415 \cdot 0,25^2 = 0,785 \text{ мм}^2 (0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2),$$

$$V = 4\pi R^3/3 = 4 \cdot 3,1415 \cdot 0,25^3/3 = 0,0654 \text{ мм}^3 (0,0654 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3).$$

$$c = \sum_j c_j \rho_j V_j = 408 \cdot 8000 \cdot 0,0327 \cdot 10^{-9} + 437 \cdot 8915 \cdot 0,0327 \cdot 10^{-9} = 0,0234 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/К.}$$

$$\varepsilon_o = \frac{c}{\alpha S} = 0,0234 \cdot 10^{-2} / (\alpha \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}) = 298/\alpha.$$

α – коэффициент теплообмена между поверхностью термопары и средой согласно расчетов равен 55 Вт/(м²·К). Термопары применяются как для измерения температуры масла, так и для измерения температуры воздуха.

В итоге инерционность термопары составит не менее $298/55 = 5,4$ сек., что следует учитывать в виде поправки при исследовании неустановившихся процессов изменения температуры.

Аналогично для применяемых термопар горячий спай хромель-копель с диаметром проволоки равен 0,2 инерционность составит 2 секунды.

Приложение №8 Тарировка термопары спай хромель-копель диаметр 0,2 мм

Тарирование термопары проводилось в климатической камере КТВВ 8000 параметры которой приведены в приложении 6.

Термопара помещали в климатическую камеру, и подключали к вольтметру В7-78/1. Погрешностью измерений 0,35 мкВ. С изменением температуры фиксировалось напряжение вырабатываемое термопарой. Результаты измерений представлены на рисунке П.4.

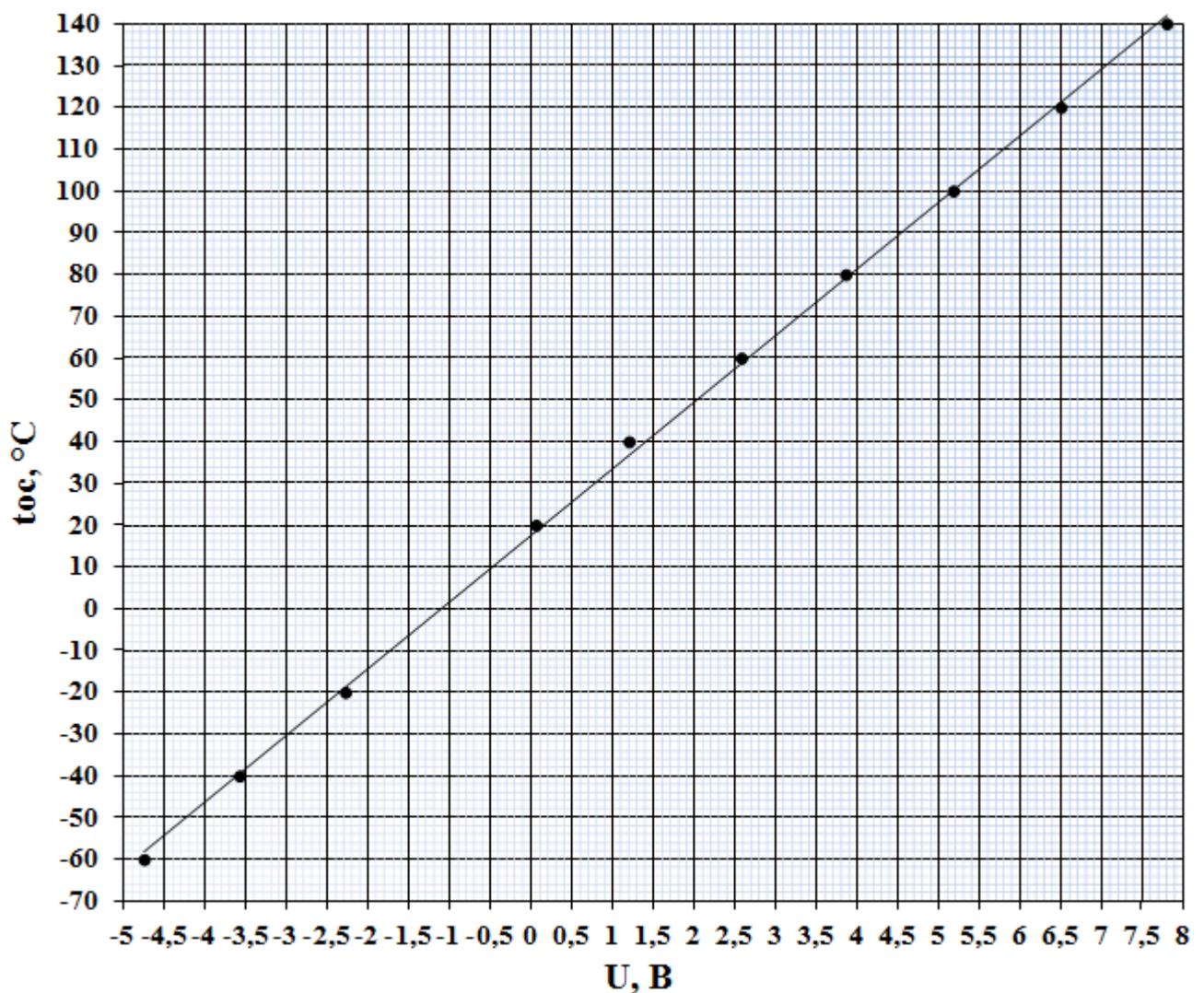


Рисунок П.4– Напряжение термопары в зависимости от температуры окружающей среды

Приложение №9 Основные параметры и характеристики стартера

1. Направление вращения вала стартералевое со стороны привода
2. Номинальное напряжение стартера24В
3. Номинальная мощность стартеране менее 2,9 кВт
4. Пусковая мощность стартеране менее 2,5 кВт
5. Потребляемый ток реле не более 50А при температуре окружающей среды $+20\pm 5^{\circ}\text{C}$ для пускового режима.
6. При нормальных значениях климатических факторов внешней среды по ГОСТ 15150 рабочие характеристики стартера должны соответствовать значениям, указанным в таблице П. 9.1.

Таблица П. 9.1

Характеристика стартера

При холостом ходе			При полном торможении		
напряжение на клеммах, В	потребляемый ток, (вместе с реле) А, не более	частота вращения вала привода, мин^{-1} , не менее	напряжение на клеммах, В	потребляемый ток, (без реле) А, не более	Тормозной момент, Н·м(кг·с·м) не менее
24	55	4000	14	80	27(2,76)

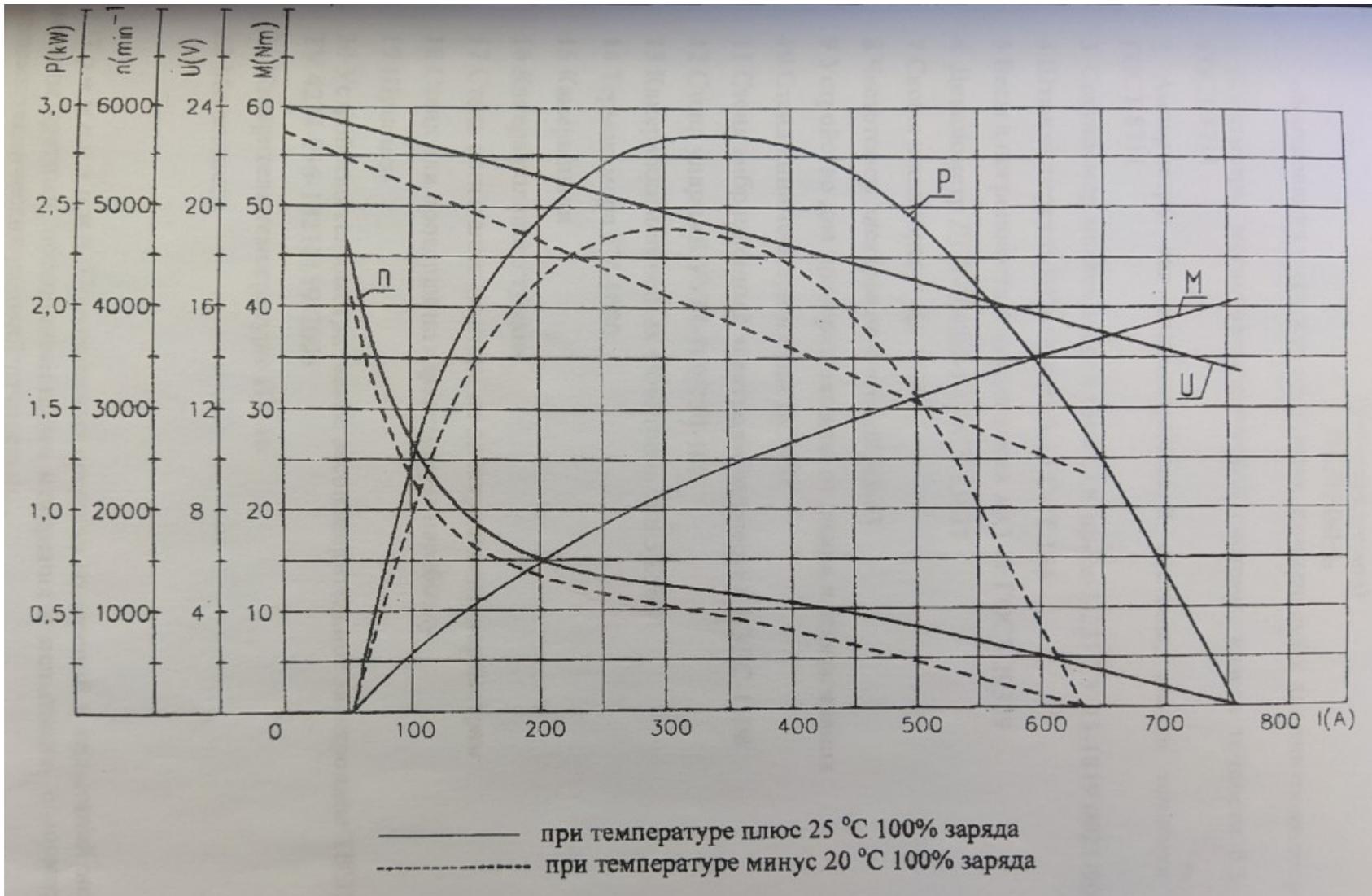


Рисунок П.5— Номинальные и пусковые характеристики с аккумуляторной батареей 132 Ач определенные по ГОСТ Р 53829

Приложение № 10 Методика вычисления частоты вращения коленчатого вала с помощью осциллографа

Число колебаний ν , (Гц) совершаемых за один оборот коленчатого вала определяется по формуле:

$$\nu = \frac{m_z}{t_1} \quad (\text{П.10.1})$$

где: m_z – количество колебаний (зубьев маховика); t_1 – время одного оборота коленчатого вала, (сек).

Из формулы П 1.1 определяем время одного оборота.

Средняя угловая скорость ω_1 , (рад/сек) одного оборота коленчатого вала определяется по формуле:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi}{t_1} \quad (\text{П.10.2})$$

Частота вращения коленчатого вала n , (мин^{-1}) определяется соответственно по формуле:

$$n = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi} \cdot 60 \quad (\text{П.10.3})$$

Приложение №11 Определение кинематической вязкости смеси моторного масла с бензином

Кинематическая вязкость смеси моторного масла М-4з/14Д₂ с бензином при пуске определена экспериментально с помощью вискозиметра ВПЖ-4. Зависимость вязкости от температуры окружающей среды представлена на рунке П 6.

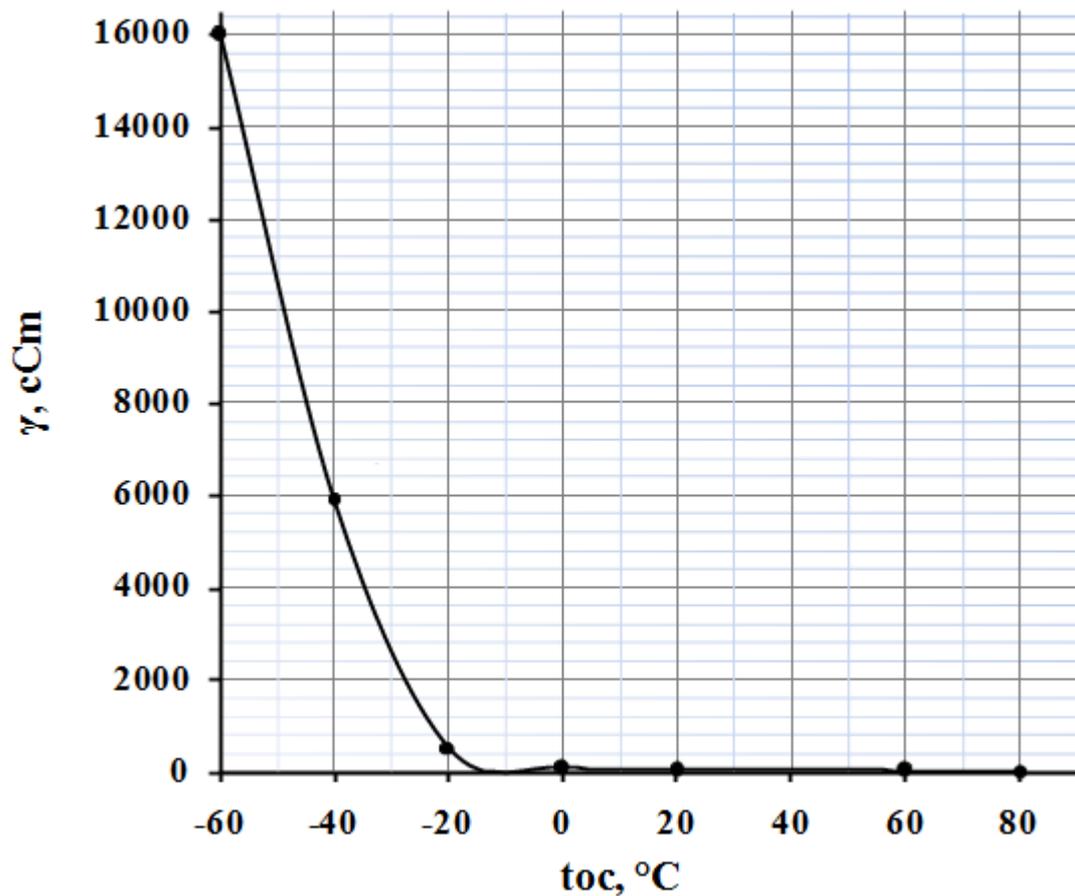


Рисунок П 6 – Зависимость кинематической вязкости смеси масла М-4з/14Д₂ с бензином

Приложение №12 Перечень исходных данных

Обозначение	Значение	Ед. изм.	Описание
1	3	4	5
$\varphi_{вп1}$	335	°п.к.в.	Угол открытия впускного клапана
$\varphi_{вп2}$	605	°п.к.в.	Угол закрытия впускного клапана
$\varphi_{вып1}$	95	°п.к.в.	Угол открытия выпускного клапана
$\varphi_{вып2}$	380	°п.к.в.	Угол закрытия выпускного клапана
$h_{кл}(\varphi)$	2,16	мм	Высота подъема клапана
$D_{кл.вп}$	0,04	м	Диаметр впускного клапана
$D_{кл.вып}$	0,036	м	Диаметр выпускного клапана
$\alpha_{кл}$	45	гр.	Угол фаски клапанов
$d_{ц}$	0,095	м	Диаметр цилиндра
r_k	0,044	м	Радиус кривошипа
$l_{ш}$	0,136	м	Длина шатуна
$l_{ю}$	0,0517	м	Длина юбки поршня
s_{k1}	0,005	м	Расстояние между первым и вторым кольцом
s_{k2}	0,004	м	Расстояние между вторым и третьим

			КОЛЬЦОМ
$W_{\text{КС}}$	$3,21 \times 10^{-5}$	м^3	Объем камеры сгорания
$S_{\text{КС}}$	0,0185	м^2	Площадь камеры сгорания
$S_{\text{г.ц.}}$	0,276	м^2	Площадь головки в сборе
$S_{\text{в.п.ц.}}$	0,132	м^2	Площадь внешней поверхности цилиндра.
$S_{\text{н.п.п.}}$	0,019	м^2	Площадь нижней части цилиндра
μf	от 1,051 до 1,887	мм^2	Эквивалентная площадь утечек в ЦПГ
$\varepsilon \partial$	19	-	Действительная степень сжатия
$m_{\text{пр}}$	0,715	кг	Приведенная масса поршня
$J_{\text{пр}}$	0,014	кг м^2	Приведенный момент инерции
$m_{\text{пр+палец+кольца}}$	0,88	кг	Масса поршень+кольца+палец
$m_{\text{маховик}}$	9,4	кг	Масса маховика
$m_{\text{шатуна}}$	0,94	кг	Масса шатуна
$m_{\text{колен}}$	7,840	кг	Масса коленчатого вала
$m_{\text{цилиндра}}$	2,9	кг	Масса цилиндра

$m_{\text{головки}}$	3,4	кг	Масса головки в сборе без свечи и форсунки
$m_{\text{ц}}$	$3,87 \cdot 10^{-5}$	кг	Цикловая масса топливной смеси на пусковом режиме
$m_{\text{форсунки}}$	0,291	кг	Масса форсунки
$m_{\text{сечи}}$	0,03-0,05	кг	Масса свечи
$G_{\text{т}}$	0,164	кг/ч	Часовой расход топлива на пусковом режиме

Приложение №13 Расчет цикловой массы топливной смеси

Плотность смеси рассчитывается по формуле[62]:

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{m_{\text{ДТ}} + m_{\text{К}}}{V_{\text{ДТ}} + V_{\text{К}}} \quad (\text{П.13.1})$$

где, $V_{\text{ДТ}}$ – объем ДТ, кг/м³; $V_{\text{К}}$ – объем керосина ТС-1, кг/м³; $m_{\text{ДТ}}$ – масса ДТ; $m_{\text{К}}$ – масса ДТ керосина ТС-1, кг.

Объем ДТ в смеси составляет 2,5 л, объем керосина ТС-1 составляет 7,5 л.

Плотность керосина ТС-1 $\rho_{\text{К}}$ при минус 60 °С составляет 837,2 кг/м³ [19].

Плотность ДТ зимнего $\rho_{\text{ДТ}}$ при минус 60 °С составляет 900 кг/м³ [74].

Таким образом плотность смеси $\rho_{\text{смеси}}$ составит 852,9 кг/м³.

Цикловая доля впрыскиваемого топлива $V_{\text{Ц}}$ составляет 45,4 мм³ [81].

Цикловая масса топливной смеси $m_{\text{Ц}}$, (кг) рассчитывается как произведение плотности смеси на цикловой объем впрыскиваемой порции:

$$m_{\text{Ц}} = \rho_{\text{смеси}} \cdot V_{\text{Ц}} \quad (\text{П.13.2})$$

Подставив числовые значения, получим что цикловая масса топливной смеси составит $3,87 \cdot 10^{-5}$ (кг).

Приложение №14 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661037

Динамическая модель быстроходного дизеля с воздушным охлаждением

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Платонов Константин Юрьевич (RU), Павлов Денис Викторович (RU), Хмелев Роман Николаевич (RU)*

Заявка № **2020660170**

Дата поступления **07 сентября 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 сентября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илларионов Г.П. Илларионов

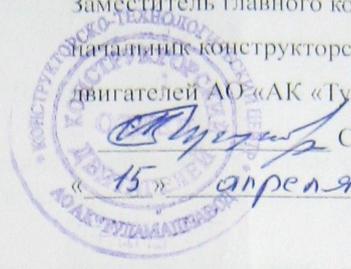


Приложение № 15. Акт внедрения результатов работы в производственный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного конструктора-
начальник конструкторского отдела
двигателей АО «АК «Туламашзавод»

 С.В. Чугунов
«15» апреля 2022г.



АКТ

**о внедрении в работу конструкторского отдела двигателей
АО «АК «Туламашзавод» программного обеспечения «Динамическая модель пуска и
функционирования быстроходного дизеля с воздушным охлаждением в условиях
отрицательных температур окружающей среды»**

Комиссия в составе:

Чугунов С.В., начальник КО двигателей	председатель комиссии:
Недорезов В.Д., ведущий инженер конструктор КО двигателей	член комиссии:
Голиков Д.В., ведущий инженер конструктор КО двигателей	член комиссии:

составила настоящий акт о том, что:

1. В период с «1» апреля 2022г. по «15» апреля 2022г. комиссия провела приемку программного обеспечения «Динамическая модель пуска и функционирования быстроходного дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды», разработанного в процессе диссертационного исследования аспиранта Павлова Д.В.
2. Комиссии были предъявлены следующие материалы:
 - 2.1. Описание программного обеспечения и руководство пользователя.
 - 2.2. Результаты апробации программного обеспечения.
 - 2.2.1. Примеры расчета пуска и функционирования ДВС, с учетом влияния изменения эксплуатационных и конструктивных параметров в условиях отрицательных температур окружающей среды.
3. Комиссия установила:
 - 3.1. Работоспособность программного обеспечения, проиллюстрированную примерами расчетов динамической модели.
 - 3.2. Возможность применения предлагаемого программного обеспечения для установления закономерностей, определяющих связь конструктивных и эксплуатационных параметров дизеля с его выходными характеристиками для условий отрицательных температур окружающей среды.

3.3. Возможность применения разработанного программного обеспечения для исследования предпусковой подготовки и пуска дизелей семейства ТМЗ в условиях отрицательных температур окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представленное программное обеспечение разработано с учетом особенностей характерных для одноцилиндровых дизелей с воздушным охлаждением, к которым относятся дизели семейства ТМЗ.

2. Программное обеспечение позволяет установить закономерности влияния эксплуатационных и конструктивных параметров на характеристики ДВС в условиях отрицательных температур окружающей среды до -60°C .

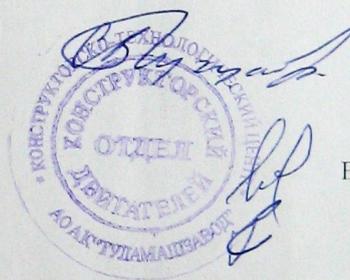
3. Подтверждена адекватность математической модели реальным объектам.

4. Применение программного обеспечения позволяет сократить материальные и временные затраты, связанные с проектированием и доводкой многоцелевых ДВС.

5. Комиссия рекомендует программное обеспечение к применению в практике АО «АК «Тулампашзавод» при исследовании функционирования, проектировании и доводке многоцелевых ДВС.

Председатель комиссии

Члены комиссии



С.В. Чугунов

В.Д. Недорезов

Д.В. Голиков

Приложение № 16. Акт внедрения результатов работы в учебный процесс кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
цифровизации ТулГУ
В.В. Котов

« » 2022 г.



АКТ

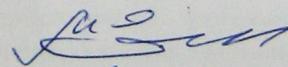
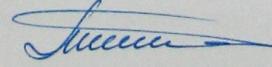
**об использовании результатов кандидатской диссертации
Павлова Дениса Викторовича в учебном процессе
кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство»**

Комиссия в составе:

д.т.н. доцент, зав кафедрой АиАХ Агуреев И.Е.	председатель комиссии;
д.т.н. проф., проф. кафедры АиАХ Елагин М.Ю.	член комиссии;
к.т.н. доцент, доцент. кафедры АиАХ Тишин С.А.	член комиссии;

составила настоящий акт о том, что ряд положений и выводов диссертационной работы Павлова Д.В. был использован при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по курсам «Силовые агрегаты автомобилей», «Основы научных исследований и планирования экспериментов на транспорте», «Основы математического моделирования технических систем».

В учебный процесс были внедрены результаты, связанные с разработкой комплекса математических моделей и программного обеспечения расчета функционирования поршневых двигателей, а так же результаты экспериментов по исследованию пуска и работы одноцилиндрового дизеля с воздушным охлаждением в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Председатель комиссии		И.Е. Агуреев
Члены комиссии	 	М.Ю. Елагин С.А. Тишин