



ПАВЛОВ Денис Викторович

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

Специальность 05.04.02-Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Тульский государственный университет".

Научный руководитель: Хмелев Роман Николаевич, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Обозов Александр Алексеевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Тепловые двигатели»;  
Барченко Филипп Борисович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет»

Защита состоится «27» сентября 2022 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе ФГБОУ ВО ТулГУ по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ и на сайте [www.tsu.tula.ru](http://www.tsu.tula.ru).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ТулГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.271.12.

Автореферат разослан «22» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Хмелев Роман Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 таких изделий как: дизель-генераторные установки, буровые установки, мотоблоки/мини-тракторы, автономные сварочные агрегаты, мотопомпы.

Зачастую применение изделий связано с жесткими условиями эксплуатации в достаточно отдаленной от инфраструктуры местности. Для условий Арктики с температурами окружающей среды в зимний период до минус 60°C, серьезной проблемой является обеспечение надежного, гарантированного пуска и работоспособности малогабаритного дизеля с воздушным охлаждением. Важной особенностью дизеля будет являться способность его автономного пуска без применения стационарных, а также 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.

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

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 устройства и алгоритм предпусковой подготовки и последующего пуска малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением в условиях арктических, до минус 60 °C, температур окружающей среды.

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

**Предметом исследования** является 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;

**Методология и методы исследования:** в основе исследований лежат расчетно-экспериментальные методы, базирующиеся на теории рабочих процессов поршневого двигателя внутреннего сгорания (ПДВС), тепломеханике, статистическом анализе и вычислительной математике, а также известных и апробированных на практике экспериментальных методах исследования ПДВС.

**Достоверность результатов** исследования базируется на:

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

**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 также действующего макетного образца устройства для его реализации пуска.

**Апробация результатов.** Результаты исследований доложены и обсуждены на:

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

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

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

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

- Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", г. Сочи, 2020;

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

#### **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.

**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.

**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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, изложена научная новизна и практическая значимость, отражены методы исследования.

Для систематизированного подхода к решению данной проблемы предложена классификация диапазона отрицательных температур окружающей среды, согласно которой арктическими принимаются температуры от минус 45 °С и ниже.

**В первой главе** представлен анализ состояния проблемы пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Пуск рассматривается как 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 – показатели, определяющие пусковые качества двигателя.

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., Ташкевич Л.Н., Харитонов В.В., Чудов В.И., Шавлов А.В., Шишков В.В. и др.

Рассмотрены особенности затрудненного пуска дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды связанные с:

- низкой температурой воздушного заряда;
- повышенным сопротивлением проворачиванию коленчатого вала и перемещению других, кинематически с ним связанных деталей (поршни, детали механизма газораспределения; и т.д.), из-за увеличенной вязкости масла;
- ухудшением условий распыливания топлива;
- усиленной теплоотдачей в стенки цилиндра;
- потерей части воздушного заряда.

Предложена классификация систем облегчения пуска ПДВС при отрицательных температурах окружающей среды.

Анализ научных трудов, посвященных вопросам облегчения пуска дизельных двигателей показал, 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.

Проведенный обзор запатентованных технических решений, методов и средств облегчения пуска ПДВС позволил определить, что 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 темпе-

ратура в конце такта сжатия определяется в первую очередь температурой в конце такта впуска.

Выводы, сформулированные в первой главе, позволили предложить наиболее перспективный способ пуска, а именно, способ, предусматривающий наличие во впускном тракте дополнительного обводного воздуховода с размещенным в нем нагревательным устройством и циркуляцией через корпус воздушного фильтра впускного воздуха и последующей принудительной подачей его в цилиндр дизеля.

Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

**Вторая глава** диссертации посвящена анализу работы объекта исследования в условиях отрицательных температур окружающей среды. Представлен обзор штатных систем дизеля применяемых для облегчения пуска. Проведен анализ протоколов пуска и методики пуска (работы) исследуемого дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Проведены экспериментальные исследования 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 КТВВ 8000.

Измерительное оборудование:

- термопары типа ТД 701Е, ТД 714Е для измерения изменения температуры масла в картере дизеля;
- устройство измерения Термодат–10К6;
- термопара хромель-копелевая для измерения средней температуры в камере сгорания дизеля;
- вольтметр универсальный В7-78/1;
- осциллограф UNI–T UTD 2025cl;
- датчик частоты вращения коленчатого вала 23.3847.

Исследования (рисунок 1) проводились при температуре окружающей среды  $t_{oc}$  от минус 10 °С до минус 60 °С через каждые 10 °С, с включением подогревателя масла и свечи накаливания, по методике экспериментальных исследований, на стадии пуска дизеля электростартером без подачи топлива, с имитацией трехкратного пуска дизеля в течение 10 секунд с интервалом в 30 секунд между включением электростартера.



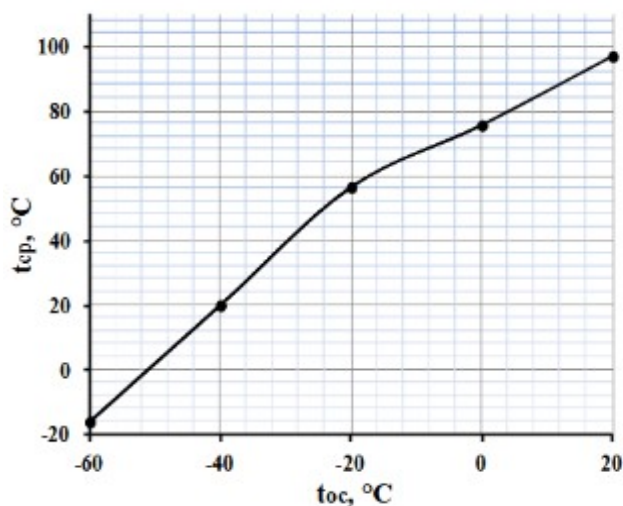
а)

б)

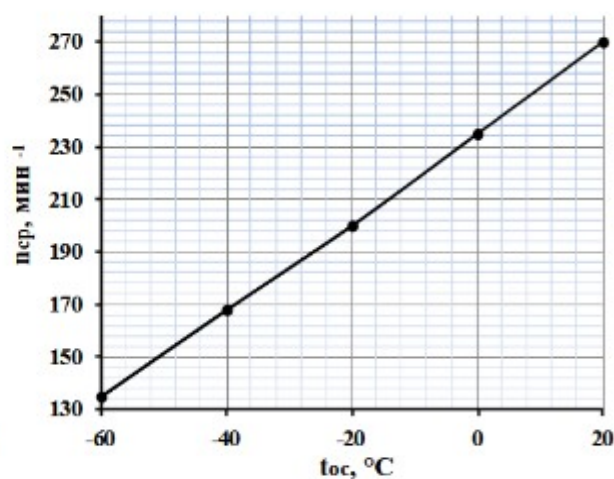
Рисунок 1 – Фото дизеля: а) – в климатической камере при температуре окружающей среды  $t_{oc}$  минус  $60^{\circ}\text{C}$ ; б) – без крышки корпуса вентилятора

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить:

- средняя температура в цилиндре дизеля на режиме прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером при температуре окружающей среды минус  $60^{\circ}\text{C}$  не превышает минус  $16^{\circ}\text{C}$  (рисунок 2.а).
- средняя пусковая частота дизеля на режиме прокручивания коленчатого вала дизеля электростартером окружающей среды минус  $60^{\circ}\text{C}$  составляет  $130\text{--}140\text{ мин}^{-1}$  (рисунок 2.б);



а)



б)

Рисунок 2 – Изменение средней температуры в цилиндре (а) и изменение средней пусковой частоты (б) в зависимости от температуры окружающей среды

Обзор штатных систем облегчения пуска, анализ документации по пуску дизеля в условиях отрицательных температур, результаты проведенных исследований позволили определить следующее:

- к существующим штатным средствам облегчения пуска дизеля необходима установка дополнительного устройства, способного существенно увеличить температуру в камере сгорания для воспламенения топливовоздушной смеси в конце такта сжатия.

- необходима доработка существующей методики пуска в условиях отрицательных температур окружающей среды, учитывающая наличие дополнительных систем облегчения пуска, а также простоту и эффективность ее применения.

Выводы, полученные в первой и второй главах, позволили выдвинуть **гипотезу диссертационного исследования** – принудительная подача в цилиндр предварительно разогретого воздушного заряда обеспечивает гарантированный и надежный пуск дизеля типа 1Ч9,5/8,0 в условиях арктических, до минус 60 °С, температур окружающей среды.

**В третьей главе** проведен анализ математических моделей, направленных на исследование пусковых режимов и предпусковых процессов ПДВС, разработана классификация математических моделей.

Существенный вклад в моделирование процессов, связанных с пуском дизеля, внесли Бабичев А.А., Боровиков В.Ф., Бондарь В.Н., Вибе И.И., Денешко Л.В., Козлов А.А., Мамонтов М.А., Мерданов Ш.М., Малиованов М.В., Новопашин Л.А., Овчинников А.И., Патрахальцев Н.Н., Подчуфаров Б.М., Разлейцев Н.С., Смолин А.А., Шишков В.В., Шавлов А.В., Шароглазов Б.А. и др.

Анализ математических моделей пусковых режимов и предпусковых процессов ПДВС позволил выделить наиболее распространенные типы моделей и допущений для математического описания работы ПДВС на режиме пуска.

Разработана динамическая многоцикловая математическая модель пуска и функционирования одноцилиндрового дизеля в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Математическая модель дизеля базируется на тепломеханике (термодинамике открытых систем). 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 основных дифференциальных уравнений.

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

- рабочее тело – идеальный газ;
- состояние рабочего тела в рабочей полости квазиравновесное;
- процесс подачи топлива в камеру сгорания, а также смесеобразование происходит практически мгновенно;
- температура впрыскиваемого в камеру сгорания топлива не учитывается;
- процесс тепловыделения моделировался по методике И.И. Вибе;

- течение рабочего тела через проходные течения впускного и выпускного клапанов рассматривается как квазистационарное;
- воздействия волновых явлений на параметры потока во впускном и выпускном трубопроводах не учитываются;
- клапанная система безинерционная;
- 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.

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

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

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

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:

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

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

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) – (3.7) использовались следующие условные обозначения:  $\tau$  – время;  $T, \rho$  – температура и плотность рабочего тела в цилиндре;  $T_k, \rho_k$  – 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;  $\omega$  и  $\varphi$  – 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;  $\dot{Q}_s$  – 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;  $M_o$  – движущий момент;  $M_n$  – пусковой момент;  $M_c$  – момент сопротивления.

Проверка адекватности математической модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с результатами экспериментов в климатической камере по пуску дизеля при  $t_{oc}$  минус 60 °С (рисунок 3. а, б, в) и пуску с выходом на режим холостого хода при  $t_{oc}$  минус 65 °С (рисунок 3. г).

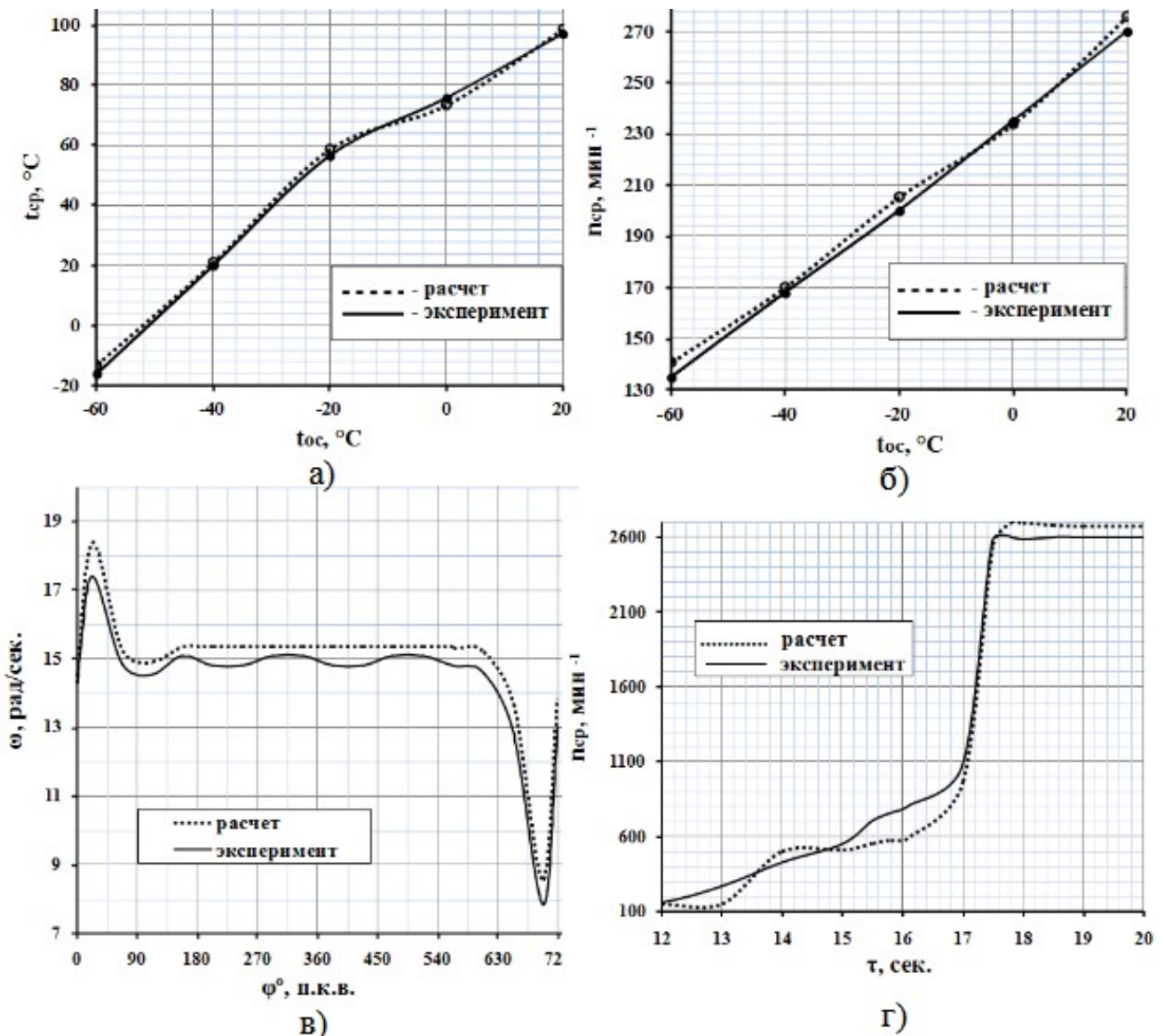


Рисунок 3: Изменение средней температуры в цилиндре дизеля (а), средней пусковой частоты (б); угловой скорости (в); частоты вращения коленчатого вала при пуске дизеля с выходом на режим холостого хода (г)

Расхождение значений сравниваемых контрольных величин на рисунке 3 не превышает 10 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

Проведена серия расчетов по определению влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на среднюю и максимальная температура в камере сгорания дизеля.

На рисунке 4 представлена расчетная оценка влияния температуры воздуха на впуске, эквивалентной площади утечек в ЦПГ, средней пусковой частоты на среднюю и максимальную температуру в камере сгорания дизеля при  $t_{oc}$  минус 60 °С.

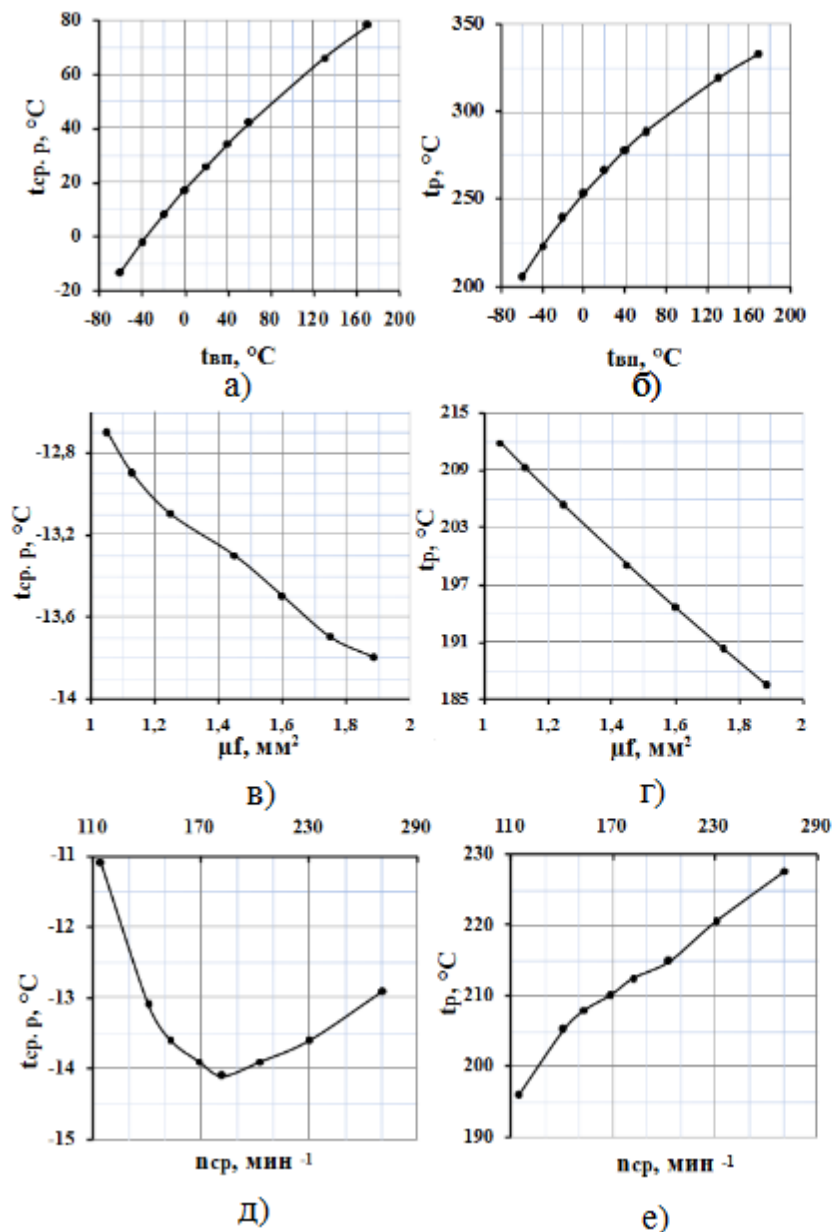


Рисунок 4 – Изменение средней( а) и максимальной (б) температуры в камере сгорания в зависимости от температуры воздуха на впуске; ( в) и (г) от эквивалентной площади утечек в ЦПГ; ( д) и (е) от средней пусковой частоты

Анализ проведенных расчетных исследований показал:

– с повышением температуры впускного воздуха значительно увеличивается средняя и максимальная температура в камере сгорания дизеля. В частности, 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.

– с увеличением эквивалентной площади утечек в ЦПГ средняя и максимальная температура в камере сгорания дизеля значительно снижается.

– с повышением пусковой частоты дизеля максимальная температура в камере сгорания существенно увеличивается. Увеличение  $\mu f$  на 0,8 мм<sup>2</sup> приводит к падению расчетной температуры в цилиндре  $t_p$  с плюс 211 °С до плюс 186 °С.

На рисунке 5 показаны результаты расчета пуска дизеля 1Ч9,5/8,0 при  $t_{ос}$  минус 65 °С и  $t_{вп}$  равной 150 °С с выходом на режим холостого хода.

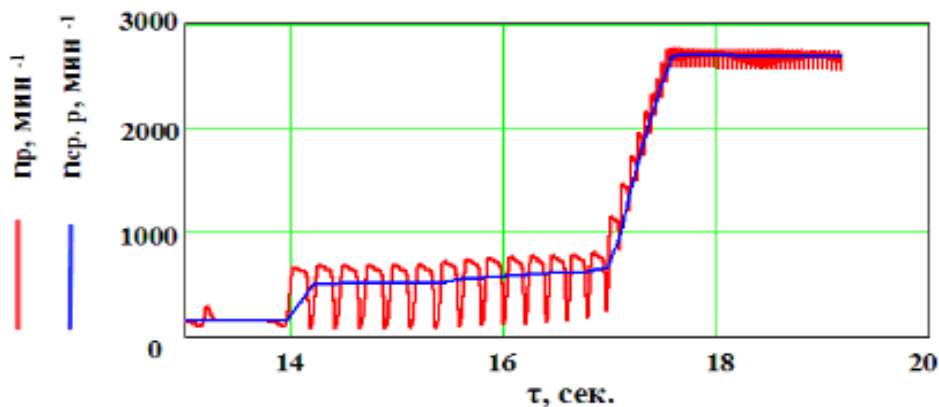


Рисунок 5 – Результаты расчета пуска дизеля 1Ч9,5/8,0 с выходом на режим холостого хода.

**Четвертая глава** посвящена реализации пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды, разработке конструкции подогревателя впускного воздуха (ПВВ), разработке рекомендаций пуска дизеля в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С.

Для определения возможности пуска дизеля при  $t_{ос}$  минус 60 °С проведены испытания дизеля с нагнетателем горячего воздуха, установленным перед впускным каналом головки цилиндра (рисунок 6).

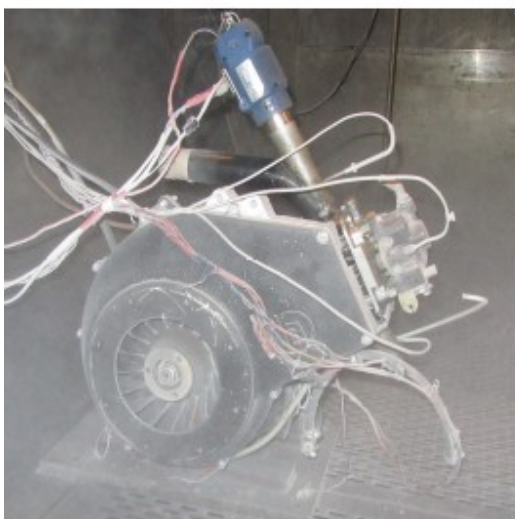


Рисунок 6 – Дизель в камере холода с нагнетателем теплого воздуха

Цель испытаний – исследование влияния подогрева впускного воздуха на среднюю температуру в цилиндре дизеля, а также проверка гипотезы о обеспечении гарантированного и надежного пуска дизеля типа 1Ч9,5/8,0 в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С путем принудительной подачи в цилиндр предварительно разогретого воздушного заряда.

В качестве нагнетателя теплого воздуха использовался термопистолет DEXTER HG-DP2000-LCD с возможностью дистанционно-

го управления и регулирования его расхода и температуры. Температура в климатической камере была установлена с запасом равной минус 65 °С.

С использованием устройства принудительной подачи нагретого воздуха, которое включалось за 1 минуту до начала включения электростартера, дизель запустился со второй попытки. Температура впускного воздуха в первоначальный момент времени составила  $150 \pm 2$  °С. Работа дизеля при испытаниях продолжалась в течении 13 минут. После чего дизель принудительно останавливался. Динамика второй попытки показана на рисунке 7.

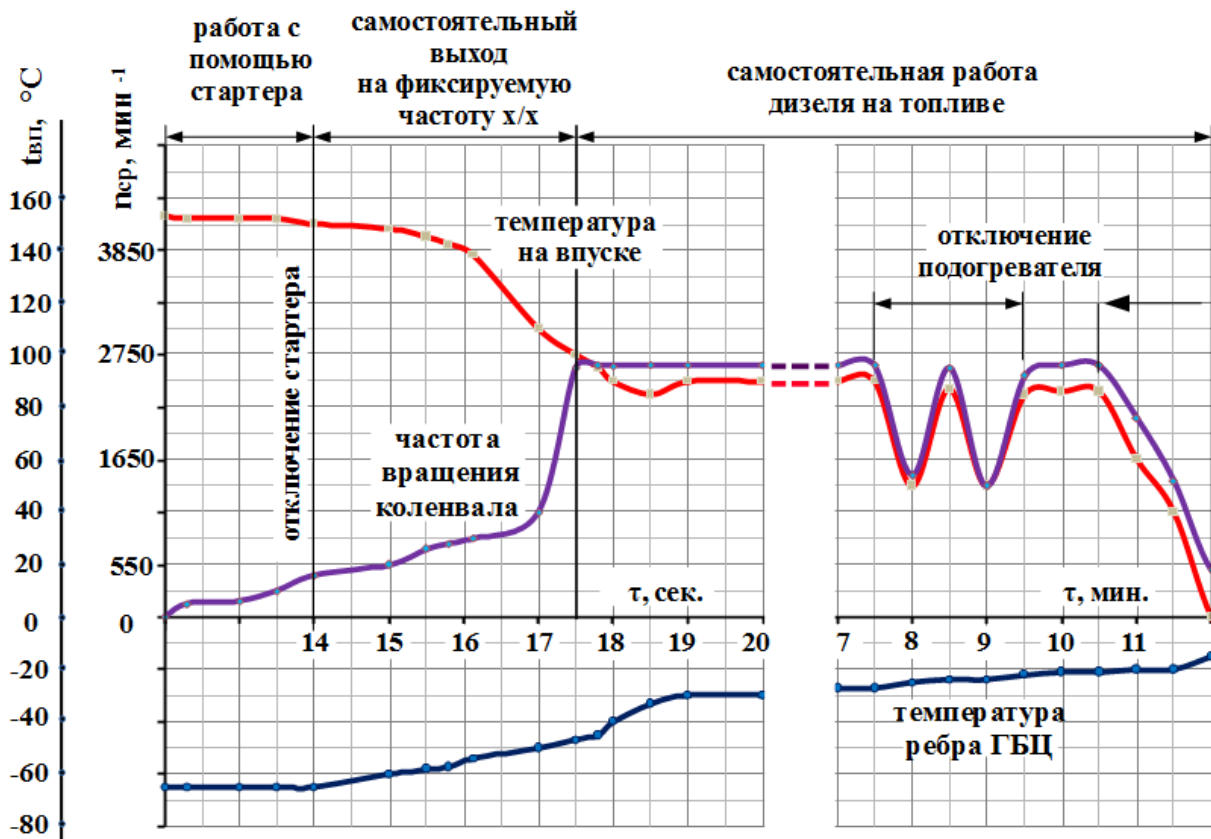


Рисунок 7 – Пуск дизеля при температуре окружающей среды минус 65 °С

Исходя из результатов обзора научных трудов и патентов, а также проведенных экспериментальных исследований и расчетов пускового режима работы дизеля 1Ч9,5/8,0 разработан действующий макетный образец подогревателя впускного воздуха (ПВВ) с напряжением питания 24 В и мощностью  $250 \pm 5$  Вт.

На рисунке 8 показан общий вид дизеля, с доработанной впускной системой. Стрелками синего цвета показан забор и движение свежего воздуха из окружающей среды. Пройдя фильтрацию холодный воздух засасывается вентилятором и далее происходит его нагрев и подача во впускной канал головки цилиндра дизеля. Красными стрелками показано движение нагретого воздушного заряда.

С использованием разработанного ПВВ произведена серия успешных пусков дизеля при температуре окружающей среды от минус 50 °С до минус 68 °С. Результаты пусков представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты пуска дизеля в условиях арктических температур при средней пусковой частоте 130 – 140 мин<sup>-1</sup>

| № | Температура окружающей среды $t_{oc}$ , °C | Температура впускного воздуха $t_{вп}$ , °C | Время прогрева впускного воздуха $\tau$ , 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                                | 150                                         | 1                                              | 1000                                       | ~190                                       | 2                  |
| 4 | минус 68 °C                                | 35                                          | 4                                              | 250                                        | ~160                                       | 6-8                |

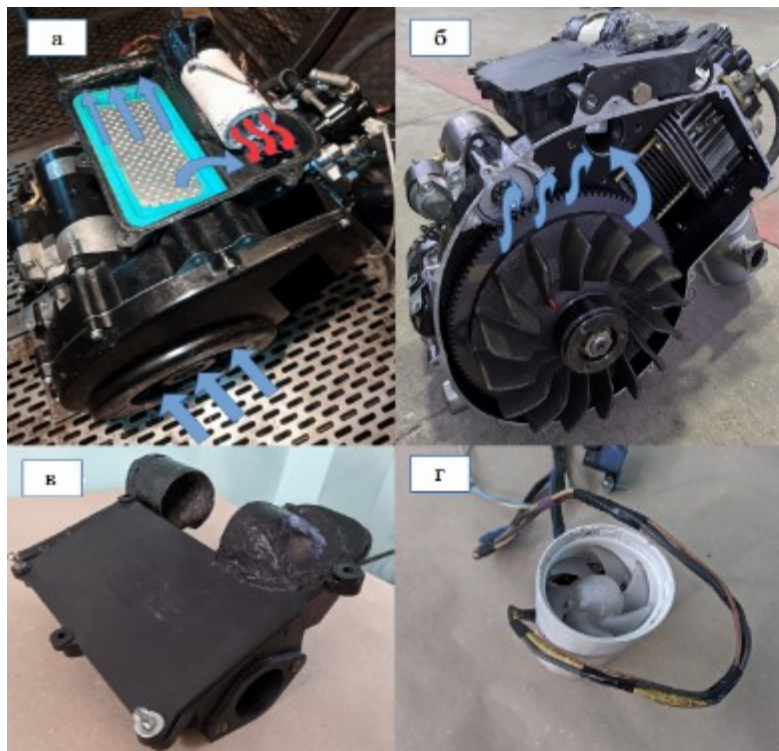


Рисунок 8 – Опытный образец ПВВ в обводном воздуховоде корпуса воздушного фильтра на дизеля: а) – движение и прогрев впускного воздуха; б) – дизель без крышки корпуса вентилятора; в) – обводной воздуховод в корпусе воздушного фильтра; г) – вид подогревателя воздуха со стороны вентилятора

Результаты исследований позволили определить, что для гарантированного пуска дизеля 1Ч9,5/8, оснащенного свечей накаливания и подогревателем масла в картере, в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °C, минимальная температура подаваемого принудительно в цилиндр дизеля впускного воздуха, должна составлять  $80 \pm 5$  °C.

## 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 1Ч9,5/8,0, 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 1Ч9,5/8,0 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 см<sup>3</sup> в условиях арктических температур окружающей среды до минус 60 °С, которая составляет 80 °С при средней пусковой частоте не менее 130 – 140 мин<sup>-1</sup>.

5. Разработано устройство подогрева и принудительной подачи воздуха, обеспечивающее пуск дизеля 1Ч9,5/8,0 во всем диапазоне отрицательных температур 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 также на дизели с меньшим рабочим объемом.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях:**

**статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus**

1. Agureev I.E., Elagin M.Yu., Pavlov D.V., Khmelev R.N. Studios of the process of heating air in the inlet pipe for starting diesel engine at low temperatures./ I.E. Agureev., Elagin M.Yu., D.V Pavlov., R.N Khmelev.// ICMTMTE 2020: BRISTOL.– ENGLAND.- 2020.– С 042028.
2. Elagin M.Y., Pavlov D.V., Khmelev R.N. Development and test of mathematical model of pre-start mode of diesel operation at low temperatures./ M.Y. Elagin, D.V. Pavlov, R.N. Khmelev// Lecture Notes in Mechanical Engineering 2021. С. 806-813.

**статьи в изданиях из перечня ВАК**

3. Павлов Д.В. 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.
4. Павлов Д.В. 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.
5. Павлов Д.В. Пуск дизельного двигателя 1Ч9,5/8,0 путем принудительной подачи предварительно разогретого воздушного заряда. / Д.В. Павлов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение: 2022.– №3(744).– С. 53 - 59.

**свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

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

**список прочих публикаций**

7. 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.
8. 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.
9. 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. – Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск: 2021. – С. 199-204.

Подписано в печать 19.07.2022.

Формат 70×100 1/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ 008а

Отпечатано в Издательстве ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 95