

На правах рукописи



КОЛУНИН Александр Витальевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СМАЗОЧНЫХ  
СИСТЕМАХ ПОРШНЕВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский политех).

Научный консультант: доктор технических наук  
**Каминский Валерий Наумович**  
(Московский политех)

Официальные оппоненты: **Власов Юрий Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и электротехники ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

**Малозёмов Андрей Адиевич**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории исследований моторно-трансмиссионного блока автомобильной, дорожно-строительной и специальной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Меджибовский Александр Самойлович**, доктор технических наук, профессор, директор по развитию ООО «НПП Квалитет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».**

Защита состоится « 29 » апреля 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ», по адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте [www.nami.ru](http://www.nami.ru) по ссылке: <https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertationcouncil>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: [rinat.kurmaev@nami.ru](mailto:rinat.kurmaev@nami.ru).

Автореферат разослан « 29 » января 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Курмаев Ринат Ханяфиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На рубеже XX–XXI в. правительства ряда государств обратили свой взор на заполярные территории нашей планеты. Интерес обосновывается комплексом аргументов. Несметные, не тронутые до настоящего времени запасы полезных ископаемых. Большое геополитическое значение, заключающееся в объединении воедино окраин материков Евразии и Северной Америки, Северного Ледовитого океана с островами, а также прилегающих частей Атлантического и Тихого океанов. Северный морской путь – кратчайшая коммуникация между европейской частью России и Дальним Востоком и воздушный мост между Северной Америкой и Юго-Восточной Азией. Значительная часть этих территорий находится под юрисдикцией Российской Федерации. Защита национальных интересов России, предусмотренная указом Президента № 645 от 26 октября 2020 г. «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», может осуществляться на основе передовых технологий и техники, приспособленной к суровым условиям заполярных регионов. Характерной особенностью последних являются отрицательные температуры, сокращающие её жизненный цикл. Выполнение указа Президента базируется на производстве современных конструкций, фундаментом которых являются новые научные знания.

Исследователи С.В. Бахмутов и М.В. Нагайцев выполнили обзор достижений и перспективных разработок отечественных научных школ в области создания вездеходных наземных транспортных средств, а В.И. Котляренко и Л.В. Барахтанов произвели анализ различных показателей транспортных средств для организации всесезонных перевозок в условиях Севера. По результатам анализа установлено, что средние статистические зависимости удельной материалоемкости различных типов машин от грузоподъемности показывают явное преимущество колёсной техники перед другими типами транспортных средств.

Автомобили занимают прочное место в вопросе перспективного развития северных территорий. По данным аналитического агентства «Автостат», на 2023 год в России насчитывалось 3,7 млн грузовых автомобилей. Более четверти (26 %) этого парка занимает КамАЗ, всего в стране зарегистрировано 963 тыс. таких грузовиков. На втором месте в рейтинге расположились грузовики производства ГАЗ с результатом 600 тыс. машин. Третью позицию занимают машины марки ЗИЛ с показателем 402 тыс. единиц. Первую пятерку дополнили автомобили МАЗ и Урал – 265 тыс. и 170 тыс. ед. соответственно. Бренды отечественного автопрома занимают более 65 % российского парка грузовиков.

Анализ работ и статистических данных выявил один из наименее приспособленных агрегатов к таким условиям – это поршневой двигатель. Низкая приспособленность объясняется работой в широких температурных и нагрузочных диапазонах с химически активными соединениями и переходными режимами.

При низкотемпературных режимах повышаются хрупкость и вязкость материалов, ухудшаются условия трения сопряжённых поверхностей, снижается полнота сгорания топлива, образуются химически активные соединения, снижается надёжность работы, сокращается ресурс.

Особое место в вопросе надёжности работы отводится состоянию смазочной системы, обеспечивающей необходимые условия трения, вынос продуктов износа,

отвод тепла, защиту от химически активных соединений. Современные средства поддержания состояния смазочных систем представляются широким многообразием технических решений: установкой термостатов, гидромурфт, шторок жалюзи, утеплителей поддонов, систем вентиляции картера, предпусковых жидкостных подогревателей, догревателей, электротенов, кранов перекрытия масляных радиаторов и т.д.

Тем не менее продолжительность жизненного цикла автотранспортных средств в условиях холодного климата составляет 75 % от продолжительности в условиях средней полосы. Накопленный объём знаний не решает проблем ресурса и стабильности состояния. Сравнительный анализ статистических данных свидетельствует о существенном различии ресурсов двигателей, применяемых в соответствующих широтах, при прочих равных условиях.

Низкотемпературный режим работы способствует активизации тепло- и массообменных, физико-химических процессов в смазочных системах, сопровождающихся снижением свойств работающего масла и образованием отложений, имеющих название «низкотемпературные».

Низкотемпературные отложения нарушают работу смазочных систем, блокируют элементы масляных фильтров и сетки маслоприёмников, снижают пропускную способность масляных магистралей, активизируя процессы изнашивания сопряжённых поверхностей. Низкотемпературные отложения являются следствием физико-химических процессов коагуляции – межмолекулярного взаимодействия продуктов с низкой агрегатной устойчивостью. Водный конденсат инициирует усиление таких взаимодействий. Вода образуется в результате окисления водорода атомами кислорода в цилиндрах, где температурные условия обеспечивают высокое давление насыщения и соответственно газообразное состояние. Рабочий процесс предусматривает движение газов через сопряжения деталей цилиндропоршневой группы. Попадая в иную температурную среду, газы охлаждаются. Снижение температуры сопровождается снижением давления насыщения. Относительное влагосодержание приводится к значению 100 %, и происходит смена агрегатного состояния воды. Направленность и активность такого физического процесса определяется температурным состоянием двигателя. Негативные последствия подобных обводнений имеют накопительный характер, неоправданно повышают динамику старения масла и процессы образования отложений, снижая пропускную способность масляных магистралей, сокращая жизненный цикл двигателей, что и представляет научную проблему, имеющую важное хозяйственное значение.

### **Степень проработанности темы исследования**

В настоящее время накоплен большой опыт применения автотранспортных средств в условиях отрицательных температур, где поршневые двигатели выполняют функцию преобразователя энергии. Специфика такого применения основывается на исследованиях в областях конструкционных материалов, рабочих процессов, разработке новых технологий производства. Значительный научный вклад в приобретение опыта низкотемпературных рабочих процессов поршневых двигателей внесли известные российские и зарубежные исследователи: В.Л. Лашхи, К.К. Папок, Г.С. Лосавко, А.Л. Чудиновских, А.В. Непогодьев, Г.И. Кичкин, Н.В. Семёнов, П.И. Кох, А.Б. Виппер, М.А. Болтанина, Л.Г. Резник, С.В. Корнеев, М.А. Зленко, А.А.

Малозёмов, Ю.А. Власов, Д.А. Загарин, Г.Г. Надарейшвили, А.С. Меджибовский, В.Ф. Кутенёв, А.В. Козлов, А.М. Сайкин, D.T. Rogers, W.W. Rice, E.L. Jonack, R.D. Quillian, N.T. Meckel, J.V. Moffitt, P.J. Aqius. Работы этих учёных совокупно определяют динамику развития настоящего научного направления.

Однако на фоне разрозненных научных исследований отсутствует единый подход к решению проблемы, не предусмотрены технологичные мероприятия по поддержанию стабильности состояния смазочных систем, специфично ориентированные на условия отрицательных температур холодного климата. По анализу научных трудов и статистических данных установлена потребность в совершенствовании тепло- и массообменных, физико-химических процессов. Совершенствование, базирующееся на глубоком познании механизма низкотемпературного осадкообразования, может представляться новыми технологичными решениями. Научные основы прикладного характера, направленные на повышение уровня системности, снижение активности поступления топливных фракций и водного конденсата в смазочные системы, обеспечат решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для ряда отраслей экономики.

**Цель исследования:** совершенствование тепло- и массообменных, физико-химических процессов в смазочных системах поршневых двигателей автотранспортных средств в условиях отрицательных температур.

Для её достижения необходимо решить ряд задач:

1. Установить факторы, снижающие жизненный цикл двигателя и обеспечивающие причинно-следственные связи между отрицательными температурами и состоянием смазочных систем. Разработать схему механизма низкотемпературного осадкообразования.

2. Разработать математическую модель конденсационного процесса в цилиндре.

3. Разработать математическую модель конденсационного процесса в картерном пространстве.

4. Экспериментально на примере двигателя КамАЗ-740.30 определить зависимость расхода картерных газов от температуры охлаждающей жидкости и зависимость массовых накоплений водного конденсата в смазочной системе от температуры картерных газов при прогреве в условиях отрицательных температур.

5. Определить зависимости содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) и зависимость щелочного числа от концентрации воды в товарном масле.

6. Найти и идентифицировать элементы-индикаторы присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) в осадке обводнённого товарного масла. Подтвердить гипотезу осадкообразующего влияния водного конденсата на продукты низкой агрегатной устойчивости.

7. Разработать рекомендации по мониторингу и диагностике состояния смазочных систем поршневых двигателей автотранспортных средств, а также новые решения по совершенствованию тепло- и массообменных, физико-химических процессов применительно к условиям отрицательных температур.

**Объект исследования:** тепло- и массообменные, физико-химические процессы в смазочных системах поршневых двигателей автотранспортных средств в условиях отрицательных температур.

**Предмет исследования:** взаимодействие и закономерности тепло- и массообменных, физико-химических процессов в смазочных системах поршневых двигателей при пуске и прогреве в условиях отрицательных температур.

**Научная новизна:**

1. Разработана схема механизма низкотемпературного осадкообразования в смазочных системах, представляющая собой комплекс продуктов низкой агрегатной устойчивости и водный конденсат, инициирующий процессы усиления межмолекулярных взаимодействий с образованием отложений.

2. Разработана математическая модель конденсационного процесса в цилиндре, отличающаяся приспособленностью к поршневым двигателям и позволяющая итерационно на основе разниц парциальных давлений и плотности потока массы водного конденсата определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя.

3. Разработана математическая модель конденсационного процесса в картерном пространстве, отличающаяся регрессионной зависимостью, учитывающей расход картерных газов от температуры охлаждающей жидкости и позволяющая итерационно на основе разниц влагосодержаний определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя.

4. Определены зависимости массовых накоплений водного конденсата в смазочной системе от температуры картерных газов и расхода картерных газов от температуры охлаждающей жидкости при прогреве в условиях отрицательных температур, а также нисходящие зависимости содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) от концентрации воды в товарном масле, которые найдены и идентифицированы в осадке масла с определением массовых и атомных долей.

**Теоретическая и практическая значимость:**

1. Схема механизма низкотемпературного осадкообразования представляет собой фундаментальные знания для перспективного развития научного направления.

2. Применение математической модели конденсационного процесса в цилиндре позволяет определять расчётную массу водного конденсата, образующегося в цилиндре за период прогрева двигателя.

3. Применение математической модели конденсационного процесса в картерном пространстве позволяет определять расчётную массу водного конденсата, образующегося в картерном пространстве за период прогрева двигателя.

4. Методика определения мощности индукционного устройства теплового аккумулятора фазового перехода индукционного типа позволяет определять расчётную мощность при его проектировании и конструировании.

5. Применение газозлектрофакельного устройства позволяет снизить активность поступления топливных фракций в смазочную систему за счёт повышения температуры впускного воздуха, основанного на применении топлива лёгкого фракционного состава.

6. Внедрение в конструкцию поршневого двигателя автоматически управляемой приточно-нагреваемой системы вентиляции картера обеспечивает повышение давления насыщения, снижение влагосодержания, относительной влажности и температуры точки росы смеси газов в картерном пространстве.

7. Применение способа ультразвуковой очистки обеспечивает совершенствование массообменных процессов на основе безразборной очистки – разрыхления, отрыва и удаления отложений с поверхностей картерного пространства.

8. Результаты диссертационного исследования внедрены и реализованы в деятельности следующих организаций:

- бюджетное учреждение Омской области «Автобаза здравоохранения», г. Омск;
- общество с ограниченной ответственностью «Автокамтехобслуживание», г. Омск;
- публичное акционерное общество «Автодизель», г. Ярославль;
- общество с ограниченной ответственностью «Ремсервис», г. Екатеринбург;
- научно-технический центр публичного акционерного общества «КАМАЗ», г. Набережные Челны.

#### **Методология и методы исследования.**

Решение поставленных задач осуществлялось методом системного анализа, методом математического моделирования, методом атомной эмиссионной спектроскопии, методом растровой электронной микроскопии, методом потенциометрического титрования, методом наименьших квадратов, методом математической статистики, дисперсионного и регрессионного анализов, методом конечных элементов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Схема механизма низкотемпературного осадкообразования.
2. Математическая модель конденсационного процесса в цилиндре.
3. Математическая модель конденсационного процесса в картерном пространстве.
4. Зависимость массовых накоплений водного конденсата в смазочной системе от температуры картерных газов, определённая по влагосодержанию масла при прогреве на примере двигателя КамАЗ-740.30.
5. Зависимость расхода картерных газов от температуры охлаждающей жидкости при прогреве на примере двигателя КамАЗ-740.30.
6. Зависимости влияния воды на содержание элементов-индикаторов присадок, а также на щелочное число товарного масла.
7. Фазово-аналитические, численные значения элементов-индикаторов присадок и их оксидов, найденных в пробах осадка обводнённого товарного масла.

#### **Достоверность и обоснованность.**

Достоверность и обоснованность результатов исследований подтверждается точностью и стабильностью приведенной информации, непротиворечивостью существующим знаниям, достаточным количеством проведённых экспериментов, применением современных методов исследования, сходимостью теоретических выводов с экспериментальными данными.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационного исследований обсуждались и одобрены на:

- международной научно-технической конференции «Надёжность и ремонт машин». – Гагра, 2004;
- международном симпозиуме по трибофатике. – Иркутск, 2005;

- всероссийской конференции-семинаре «Ассоциации автомобильных инженеров». – Сургут, 2005;
- международной конференции «Смазочные материалы в промышленности». – Москва, 2005;
- III международной конференции «Проблемы механики современных машин». – Улан-Уде, 2006;
- IV международном технологическом конгрессе «Военная техника, вооружение и современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения». – Омск, 2007;
- международной выставке высокотехнологичной техники и вооружения ВТТВ-2011. – Омск, 2011;
- международной научно-практической конференции «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки». – Омск, 2014;
- VII межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военных автомобилей, наука и образование». – Омск, Броня, 2014;
- международной научно-практической конференции «Архитектура, строительство, транспорт». – Омск, 2015;
- международных научно-практических конференциях «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации». – Омск, 2016 и 2018;
- IX международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства». – Омск, 2019;
- международных научно-технических конференциях «Проблемы машиноведения». – Омск, 2019, 2021 и 2022;
- XVI научной конференции, посвященной Дню российской науки «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте». – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022;
- IX и XI международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». – Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева. – Орёл, 2023 и 2025.

**Публикации результатов работы.** Материалы диссертации отражены в 41 печатной научной работе, в том числе: в 19 статьях в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ и 10 статьях в библиографической и реферативной базе данных Scopus и (или) Web of Science; 1 монографии; 8 статьях в сборниках конференций различного уровня и в др. изданиях. Кроме того, автором получены 4 свидетельства программы для ЭВМ, 1 свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса, 3 патента РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Общий объём работы – 379 страниц, включая 31 таблицу и 75 рисунков, библиографический список из 281 наименования, перечень сокращений на 1 странице и 60 страниц приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность научной проблемы по теме работы, определена область исследований, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Представлены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, публикациях по теме исследования. Раскрыты структура и объём диссертации.

**В первой главе** выполнен обзор научных работ по влиянию отрицательных температур на состояние смазочных систем поршневых двигателей и порождению процессов, обеспечивающих причинно-следственные связи. Изменение состояния заключается в образовании мазеобразных отложений чёрного цвета.

Мазеобразные отложения блокируют элементы масляных фильтров, сетки маслоприёмников, снижают пропускную способность масляных магистралей. На рисунке 1 представлена фотография сетки маслоприёмника с типичными отложениями, имеющими название «низкотемпературные». Рассмотрены особенности процессов низкотемпературного осадкообразования, приводящих к изменению состояния смазочных систем.

В условиях отрицательных температур повышается вероятность работы двигателя на низкотемпературном режиме. Низкотемпературный режим сопровождается накоплением топливных фракций и сменой агрегатного состояния воды картерных газов. Многократные периодические обводнения суммируют негативные последствия в смазочных системах. Анализом научных трудов определено, что вода инициирует усиление межмолекулярных взаимодействий



Рисунок 1 – Типичные низкотемпературные отложения на сетке маслоприёмника

продуктов с низкой агрегатной устойчивостью. На основе анализа трудов и статистических данных, разработана схема механизма низкотемпературного осадкообразования, представленная на рисунке 2. В настоящее время не определены закономерности изменения физико-химических свойств моторных масел под воздействием водного конденсата. Не предусмотрены специальные мероприятия по поддержанию стабильности состояния смазочных систем, специфично ориентированные на условия отрицательных температур. Разрозненные технические решения не обладают должной эффективностью решения проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Установлена потребность в совершенствовании процессов в направлении снижения активности поступления топливных фракций и водного конденсата в смазочную систему. Совершенствование базируется на основе глубокого познания механизма низкотемпературного осадкообразования.

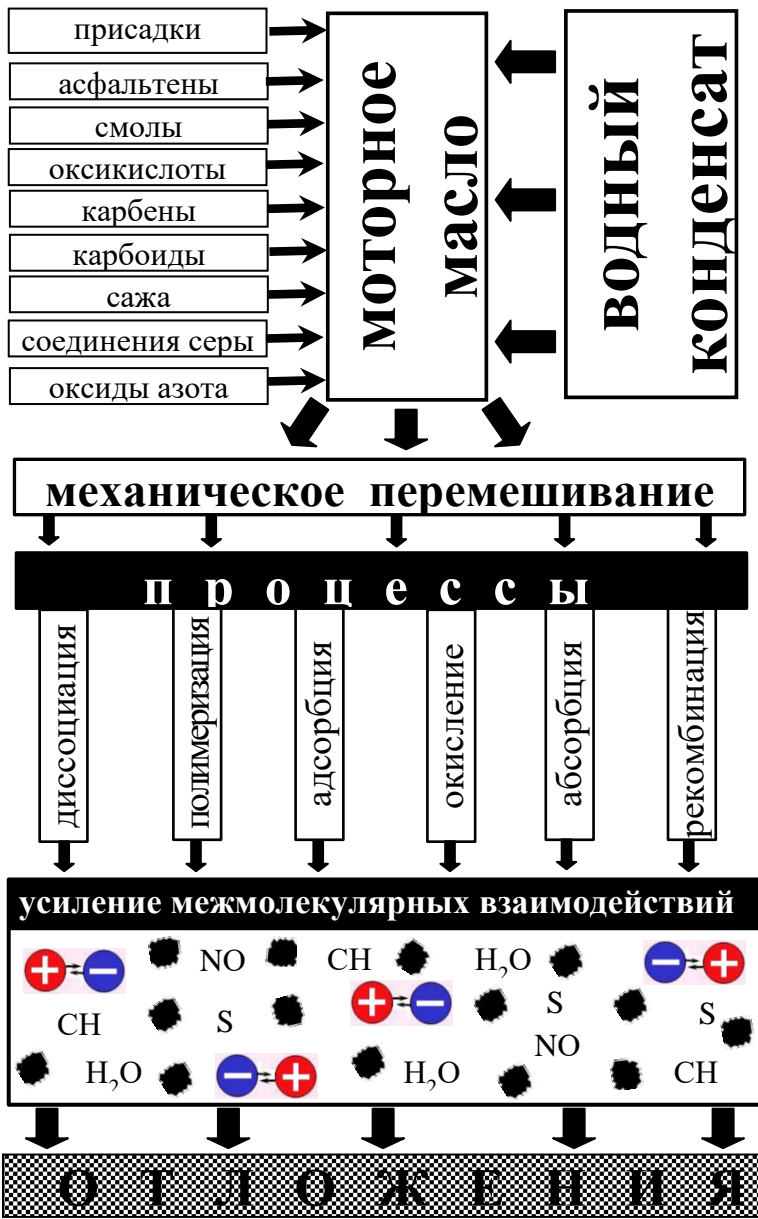


Рисунок 2 – Схема механизма низкотемпературного осадкообразования

Во второй главе представлена концепция системного подхода, описана методика выполнения работы, включающая как теоретические, так и экспериментальные исследования. Применена методология системного анализа, в основе которой лежит понятие системы. Описаны факторы, оказывающие влияние на изменение состояния системы «двигатель–масло», представленной на рисунке 3.

Завершающим этапом всех процессов, происходящих в системе «двигатель–масло», является образование отложений на деталях двигателя и коррозионно-механический износ. Последнее в значительной степени зависит от активности адсорбционных процессов, так как снижение пропускной способности масляных магистралей снижает поток к сопряжённым поверхностям. В настоящей концепции моторное масло представляется конструктивным элементом смазочной системы двигателя.

Концепция системного подхода, являясь направлением методологии, предусматривает анализ трудов и статистических данных, разработку математических моделей, описывающих реальные процессы, их глубокое

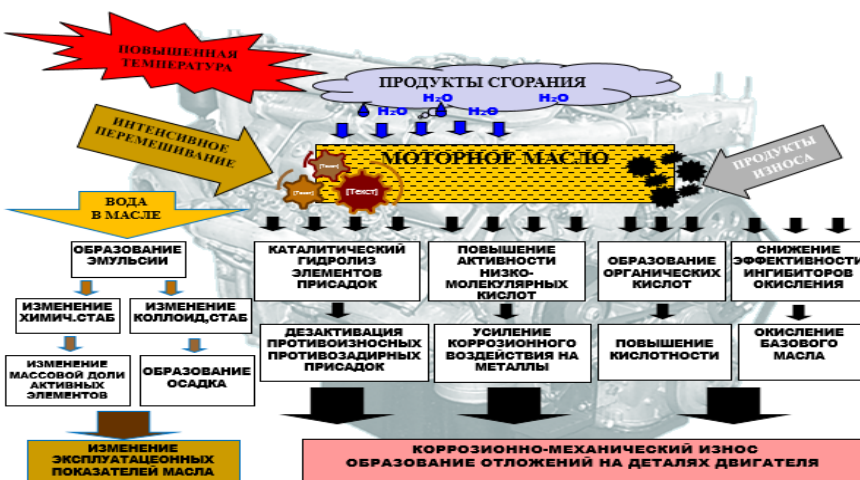


Рисунок 3 – Элементы системы «двигатель–масло»

познание, в том числе через эксперимент, разработку новых решений прикладного характера, создание благоприятных условий для перспективного развития научного направления.

**В третьей главе** определены возможные области конденсации – именно в области цилиндра и в области картерного пространства. С применением классических теорий, описывающих массообменные процессы, разработана математическая модель конденсационного процесса в цилиндре, отличающаяся приспособленностью к поршневым двигателям и позволяющая итерационно, на основе разниц парциальных давлений и плотности потока массы водного конденсата, определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя.

Математическая модель итерационного характера определяет количество воды по смене агрегатного состояния произведением плотности потока массы  $j$  на площадь конденсации  $F$  и на время, приходящееся на итерационный угол поворота коленчатого вала  $\tau$ :

$$\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} = j \cdot F \cdot \Delta \tau. \quad (1)$$

Плотность потока массы определяется произведением плотности  $\rho$  смеси газов на коэффициент массоотдачи  $\beta$  и на разницу массовых долей концентрации пара между основным объёмом и в непосредственной близости к поверхности конденсации:

$$j = \rho \cdot \beta \cdot (m_{\text{по}} - m_{\text{п гр}}). \quad (2)$$

Коэффициент массоотдачи зависит от диффузионного критерия Нуссельта, диаметра цилиндра  $d$  и коэффициента диффузии  $D$ :

$$\beta = \frac{Nu_D \cdot d}{D}. \quad (3)$$

Ввиду схожести свойств воздуха и продуктов сгорания принято при нормальных условиях  $D_0 = 0,0216 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $u = 0,8$ .

$$Nu_D = Nu_{D0} \cdot A \cdot r_{\text{сг}}^k \cdot \pi_D^l, \quad (4)$$

где  $Nu_D$  – диффузионный критерий Нуссельта;  $Nu_{D0}$  – диффузионный критерий Нуссельта, полученный на основании тройной аналогии;  $r_{\text{сг}}$  – объёмная доля сухих газов;  $\pi_D$  – показатель, характеризующий разность парциальных давлений.

Для случая течения газа в трубе, что наиболее близко к случаю течения продуктов сгорания в цилиндре поршневого двигателя, диффузионный критерий Нуссельта, полученный на основе тройной аналогии, определится выражением:

$$Nu_{D0} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_D^{0,43} \cdot r_{\text{п}}, \quad (5)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr_D$  – диффузионный критерий Прандтля;  $r_{\text{п}}$  – объёмная доля водяных паров.

Диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr_D = \frac{v_{пс}}{D}. \quad (6)$$

Кинематическая вязкость продуктов сгорания, измеряемая в м<sup>2</sup>/с, аппроксимируется выражением:

$$v_{пс} = 4,795 \cdot 10^{-11} \cdot t_{пс}^2 + 8,371 \cdot 10^{-8} \cdot t_{пс} - 1,824 \cdot 10^{-5}, \quad (7)$$

где  $t_{пс}$  – температура продуктов сгорания, °С.

$$r_{г} = \frac{p_{г}}{p_{пс}}, \quad (8)$$

где  $p_{г}$  – парциальное давление сухих газов, Па.

$$\pi_D = \frac{p_{п0} - p_{п гр}}{p_{пс}}, \quad (9)$$

где  $p_{п0}$  – парциальное давление пара вдали от стенки, Па;  $p_{п гр}$  – парциальное давление пара на границе раздела фаз, Па.

$$r_{п} = \frac{p_{п0}}{p_{пс}}; \quad (10)$$

Учитывая закон Амага-Авогадро, можно получить:

$$p_{г} = \frac{V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{возд}}{V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{возд}} \cdot p_{пс}; \quad (11)$$

$$p_{п0} = \frac{V_{H_2O}}{V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{возд}} \cdot p_{пс}. \quad (12)$$

Согласно принятому допущению, парциальное давление на стенке цилиндра приравнивается к давлению насыщения при температуре насыщения водяных паров, равной температуре охлаждающей жидкости.

Давление насыщения описывается показательной функцией:

$$p_{п гр} = e^{\frac{18,74 \cdot t_{ож} - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot t_{ож}}}, \quad (13)$$

где  $t_{ож}$  – температура охлаждающей жидкости, °С.

Для продуктов сгорания дизельного топлива  $\varepsilon_r / \pi_D > 1$ , где  $\varepsilon_r$  – отношение парциального давления сухих газов к общему давлению смеси, при этом коэффициенты в уравнении (4):  $A = 0,71$ ;  $k = -0,9$ ;  $l = -0,1$ .

В процессе прогрева температура внутренней поверхности цилиндра возрастает, и при достижении точки росы расчёт завершается. Описанные зависимости, которые в определённой последовательности сведены в схему, изображённую на рисунке 4, в совокупности представляют собой алгоритм математической модели.

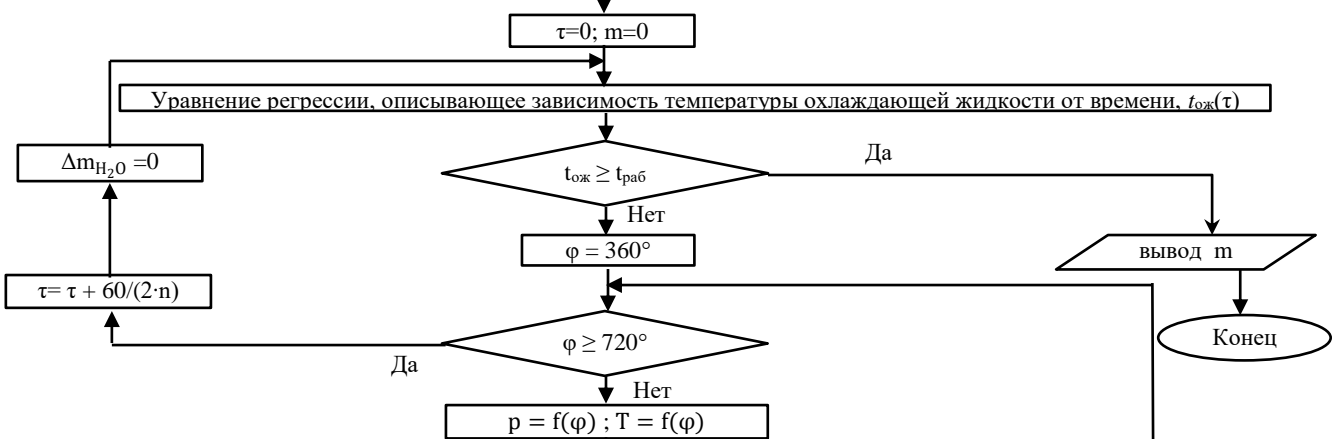
Состав топлива в массовых долях: C=0,870; H=0,126; O=0,003, S=0,0001;  
 Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ;  
 Состав воздуха в объёмных долях: N<sub>2</sub>=0,79; O<sub>2</sub>=0,21;  
 Уравнение, описывающее зависимость температуры охлаждающей жидкости от времени,  $t_{ож}(\tau)$ , °C;  
 Расчётный размер шага угла поворота коленчатого вала  $\Delta\varphi$ , ° п.к.в.;  
 Диаметр цилиндра  $d$ , м; перемещение поршня вдоль цилиндра  $S$ , м;  
 Уравнение, описывающее зависимость мгновенного значения температуры газов в цилиндре от угла поворота коленчатого вала  $T(\varphi)$ , K;  
 Уравнение, описывающее зависимость мгновенного значения давления газов в цилиндре от угла поворота коленчатого вала  $p(\varphi)$ , МПа;  
 Частота вращения коленчатого вала,  $n$ , об/мин;  
 Начальная температура охлаждающей жидкости  $t_{ож}$ , °C;  
 Рабочая температура охлаждающей жидкости  $t_{раб}$ , °C;  
 Радиус кривошипа  $R$ , м;  
 Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна  $\lambda$ .

Начало

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C + 0,375 \cdot S) + 0,265 \cdot H - 0,0333 \cdot O; \quad V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0; \quad V_{возд} = (\alpha - 1) \cdot V^0; \quad V_{RO_2} = 1,866 \cdot \frac{C + 0,375 \cdot S}{100}; \quad V_{H_2O} = 0,111 \cdot H + 0,0161 \cdot \alpha \cdot V^0$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{1,257 \cdot V_{N_2}^0 + 1,977 \cdot V_{RO_2} + 0,804 \cdot V_{H_2O} + 1,293 \cdot V_{возд}}{V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{возд}}$$

ОБЪЁМНЫЕ ДОЛИ	$\Gamma_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}$	МАССОВЫЕ ДОЛИ	$g_{H_2O} = \frac{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O}}{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд} \cdot \mu_{возд}}$	МАССЫ	$m_{H_2O} = g_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot (V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд})$	КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА	$u_{H_2O} = \frac{m_{RO_2}}{\mu_{RO_2}}$
	$\Gamma_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}$		$g_{RO_2} = \frac{\Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2}}{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд} \cdot \mu_{возд}}$		$m_{RO_2} = g_{RO_2} \cdot \rho_{H_2O} \cdot (V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд})$		$u_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}$
	$\Gamma_{N_2} = \frac{V_{N_2}^0}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}$		$g_{N_2} = \frac{\Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2}}{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд} \cdot \mu_{возд}}$		$m_{N_2} = g_{N_2} \cdot \rho_{H_2O} \cdot (V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд})$		$u_{возд} = \frac{m_{возд}}{\mu_{возд}}$
	$\Gamma_{возд} = \frac{V_{возд}}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}$		$g_{возд} = \frac{\Gamma_{возд} \cdot \mu_{H_2O}}{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд} \cdot \mu_{возд}}$		$m_{возд} = g_{возд} \cdot \rho_{H_2O} \cdot (V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд})$		



Конеч

$$p_{H_2O} = \Gamma_{H_2O} \cdot p; \quad p_r = (1 - \Gamma_{H_2O}) \cdot p; \quad p_{H_2O \text{ гр}} = 1000 \cdot e^{\frac{18,74 \cdot t_{ож} - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot t_{ож}}}; \quad V_{H_2O \text{ гр}} = \frac{\Gamma_{H_2O \text{ гр}}}{1 - \Gamma_{H_2O \text{ гр}}} \cdot (V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд});$$

$$\Gamma_{H_2O \text{ гр}} = \frac{p_{H_2O \text{ гр}}}{p}; \quad \Gamma_{RO_2 \text{ гр}} = \frac{V_{RO_2}}{V_{H_2O \text{ гр}} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}; \quad \Gamma_{N_2 \text{ гр}} = \frac{V_{N_2}^0}{V_{H_2O \text{ гр}} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}; \quad \Gamma_{возд \text{ гр}} = \frac{V_{возд}}{V_{H_2O \text{ гр}} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}};$$

$$m_{H_2O \text{ гр}} = \frac{\Gamma_{H_2O \text{ гр}} \cdot \mu_{H_2O}}{\Gamma_{H_2O \text{ гр}} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2 \text{ гр}} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2 \text{ гр}} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд \text{ гр}} \cdot \mu_{возд}}; \quad \epsilon_r = \frac{p_r}{p}; \quad \pi_D = \frac{p_{H_2O} - p_{H_2O \text{ гр}}}{p}; \quad \epsilon_{II} = \frac{p_{H_2O}}{p};$$

$$D = 0,0216 \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,8} \cdot \frac{0,1}{p}; \quad \nu = 4,795 \cdot 10^{-11} \cdot (T - 273)^2 + 8,371 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 273) - 1,824 \cdot 10^{-5};$$

$$\nu = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot \left(|\sin \varphi| + \frac{\lambda}{2} \cdot |\sin(2\varphi)|\right); \quad Re = \frac{p \cdot \nu \cdot d}{\nu}; \quad Pr_D = \frac{\nu}{D}; \quad Nu_{D0} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_D^{0,43} \cdot \epsilon_{II}; \quad Nu_D = Nu_{D0} \cdot 0,71 \cdot \epsilon_r^{-0,9} \cdot \pi_D^{-0,1};$$

$$\beta = \frac{Nu_D \cdot d}{D}; \quad j = \rho_{H_2O} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{0,1} \cdot \beta \cdot (m_{H_2O} - m_{H_2O \text{ гр}}); \quad S = R \cdot \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos \beta)\right]; \quad F = \pi \cdot d \cdot S + \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 + F_{кк}; \quad \Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{60 \cdot n}; \quad \Delta m_{H_2O} = j \cdot F \cdot \Delta\tau;$$

$$m_{H_2O} = m_{H_2O} - \Delta m_{H_2O}; \quad u_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\mu_{H_2O}}; \quad \Gamma_{H_2O} = \frac{u_{H_2O}}{u_{H_2O} + u_{RO_2} + u_{N_2} + u_{возд}}; \quad V_{H_2O} = \frac{\Gamma_{H_2O}}{1 - \Gamma_{H_2O}} \cdot (V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд});$$

$$\Gamma_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}; \quad \Gamma_{N_2} = \frac{V_{N_2}^0}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}}; \quad \Gamma_{возд} = \frac{V_{возд}}{V_{H_2O} + V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{возд}};$$

$$m_{H_2O} = \frac{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O}}{\Gamma_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} + \Gamma_{RO_2} \cdot \mu_{RO_2} + \Gamma_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + \Gamma_{возд} \cdot \mu_{возд}}$$

$$\sum m_{H_2O} = m_{H_2O} + \Delta m_{H_2O}$$

$$\varphi = \varphi + \Delta\varphi$$

Рисунок 4 – Схема алгоритма математической модели конденсационного процесса в цилиндре

На основе представленной модели определено расчётное количество воды по смене агрегатного состояния применительно к двигателю КамАЗ-740.30. Так, период прогрева при температуре минус 32 °С обеспечил смену агрегатного состояния воды в количестве 2,9 г. Построена графическая зависимость массы воды по смене агрегатного состояния от начальной температуры прогреваемого двигателя. Такая зависимость представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Зависимость массы водного конденсата, образующегося на поверхности цилиндра, от начальной температуры прогрева двигателя

Результаты теоретических расчётов свидетельствуют о существовании конденсационных процессов в цилиндрах поршневого двигателя при реализации действительного цикла на низкотемпературном режиме.

В связи с определением возможных областей конденсации также разработана математическая модель конденсационного процесса в картерном пространстве, отличающаяся регрессионной зависимостью, учитывающей расход

картерных газов от температуры охлаждающей жидкости, и позволяющая итерационно, на основе разниц начального и конечного влагосодержаний, определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя.

Для удобства в осуществлении расчётов вводятся такие понятия, как начальное и конечное влагосодержание газов. Начальное влагосодержание, определяемое на основе параметров рабочего тела, является константой и соответствует влагосодержанию газов непосредственно на входе в картерное пространство. Конечное влагосодержание – это переменная величина, соответствующая влагосодержанию непосредственно на выходе из картерного пространства. Конечное влагосодержание при прогреве двигателя возрастает по причине повышения температуры и давления насыщения. При выравнивании значений начального и конечного влагосодержаний массовая доля конденсирующихся паров будет равна нулю и расчет закончится. Накопитель произведений между массовой долей воды и массовым расходом картерных газов всех шагов итерационного цикла определит значение массовой обводнённости моторного масла за период прогрева.

Реализация модели позволила определить расчётное количество воды по смене агрегатного состояния применительно к двигателю КамАЗ-740.30. Так, период прогрева при температуре минус 32 °С обеспечил смену агрегатного состояния воды в количестве 5,3 г, что соответствует обводнению моторного масла на 0,0178 % по массе.

Схема алгоритма математической модели конденсационного процесса в картерном пространстве поршневого двигателя представлена на рисунке 6.

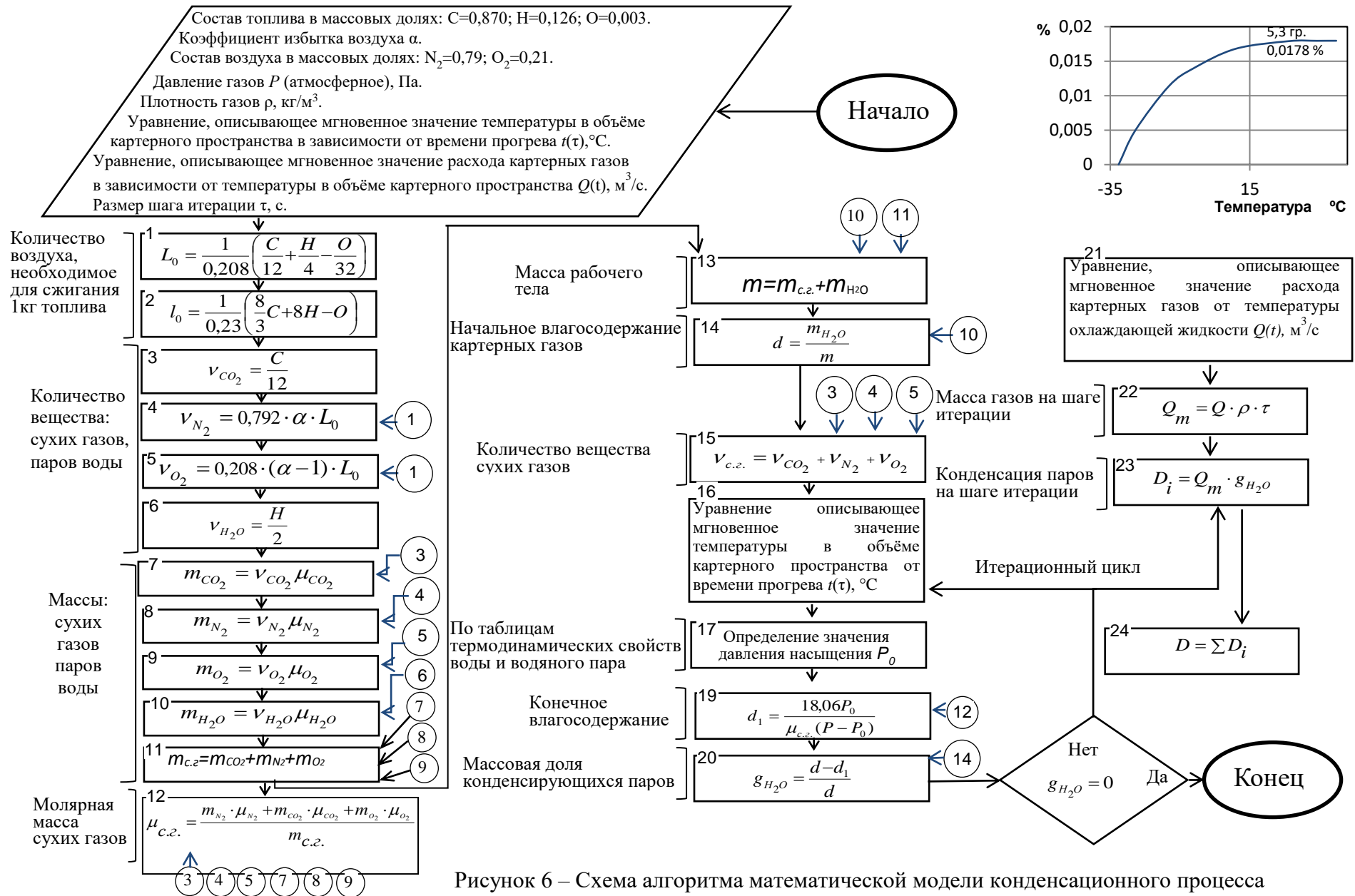


Рисунок 6 – Схема алгоритма математической модели конденсационного процесса в картерном пространстве

В четвёртой главе описаны экспериментальные исследования, состоящие из двух самостоятельных исследований, натурный и лабораторный эксперименты.

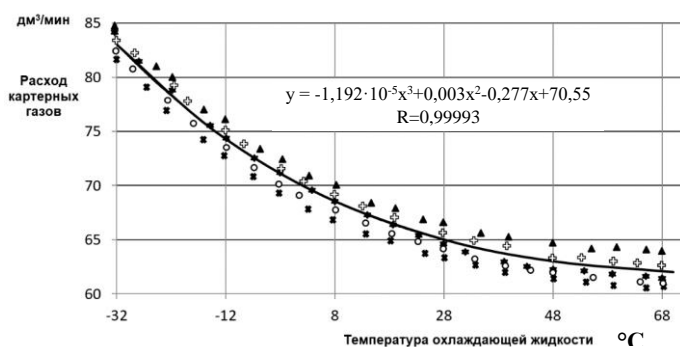
1. Для натурального эксперимента в качестве подопытных объектов выбрано 5 автомобилей КамАЗ-5350 с двигателем КамАЗ-740.30-260. Эксперимент заключался в прогреве двигателей на холостых оборотах вращения коленчатого вала при частоте  $200 \text{ мин}^{-1}$  без применения средств тепловой подготовки. В ходе эксперимента осуществлялись соответствующие замеры без остановки двигателей и производились отборы проб масел для анализа на предмет влагосодержания.

В день проведения эксперимента температура окружающего воздуха составляла минус  $32^\circ\text{C}$ , атмосферное давление –  $774 \text{ мм рт.ст.}$ , влажность воздуха –  $90 \%$ .

В процессе эксперимента решался ряд задач:

А) Определение зависимости расхода картерных газов от температуры охлаждающей жидкости. В результате замеров выведены среднеарифметические значения и построена графическая зависимость, представленная на рисунке 7. При этом установлено, что низкотемпературный режим способствует активности движения картерных газов по причине увеличения зазоров в сопряжениях

деталей цилиндропоршневой группы.



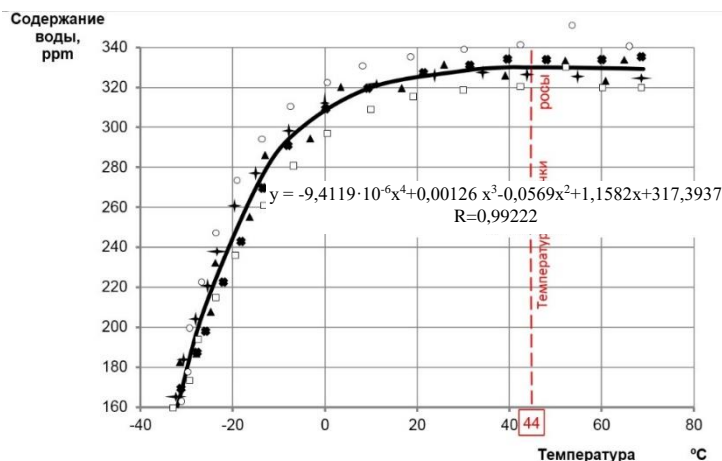
Б) Определение зависимости массового обводнения моторного масла от температуры картерных газов. По анализам проб масел на предмет влагосодержания построена графическая зависимость, представленная на рисунке 8. При этом установлено:

- начальное содержание воды в масле составляло  $160 \text{ ppm}$ , что соответствует  $0,016 \%$  по массе, или  $4,8 \text{ г}$ ;

- максимальный прирост влагосодержания составил  $178 \text{ ppm}$ , что соответствует  $0,0178 \%$  по массе, или  $5,3 \text{ г}$ ;

- экстремум кривой зависимости достиг значения  $338 \text{ ppm}$ , что соответствует  $0,0338 \%$  по массе, или  $10,1 \text{ г}$ ;

- температура точки росы для условий эксперимента составила плюс  $44^\circ\text{C}$ .



Вода с максимально зафиксированной концентрацией 0,0338 % не способна оказать существенного влияния на свойства моторного масла. Однако при многократных периодических обводнениях суммарный негативный эффект может проявляться в сокращении ресурса всей системы.

2. Исследование влияния воды на состояние моторного масла осуществлялось в лабораторных условиях.

Для решения задачи составлены смеси товарного масла «STELS Magistral E6» производства Обнинскоргсинтез с водой в определённых пропорциях. Смеси перемешивались до однородной эмульсии и выдерживались в состоянии покоя. При этом визуально определялось расслоение жидкости с образованием донного хлопьеобразного осадка жёлто-коричневого цвета. Фотографии смесей представлены на рисунке 9.



Рисунок 9 – Образование осадка в обводнённом товарном масле

С верхних уровней смесей отобраны пробы для анализов методом атомной эмиссионной спектроскопии на предмет содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор), а также на предмет щелочного числа методом потенциометрического титрования. В качестве оборудования применялся спектрометр эмиссионный индуктивно связанной плазмой серии iCAP 7000, модель 7400 Duo и титратор.

На рисунке 10 представлены графические зависимости содержания элементов-индикаторов (кальция и магния) моющей присадки от концентрации воды.

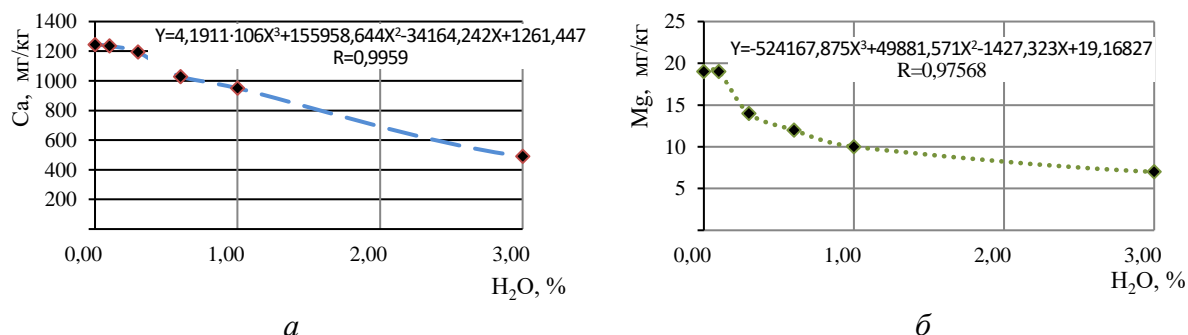


Рисунок 10 – Зависимости содержания элементов-индикаторов присадок от концентрации воды:

*a* – массовой доли кальция (Ca); *б* – массовой доли магния (Mg)

Снижение содержания кальция и магния свидетельствует о том, что вода оказывает понижающее воздействие на содержание моющей присадки.

На рисунке 11 представлены графические зависимости изменения содержания элементов-индикаторов цинка и фосфора.

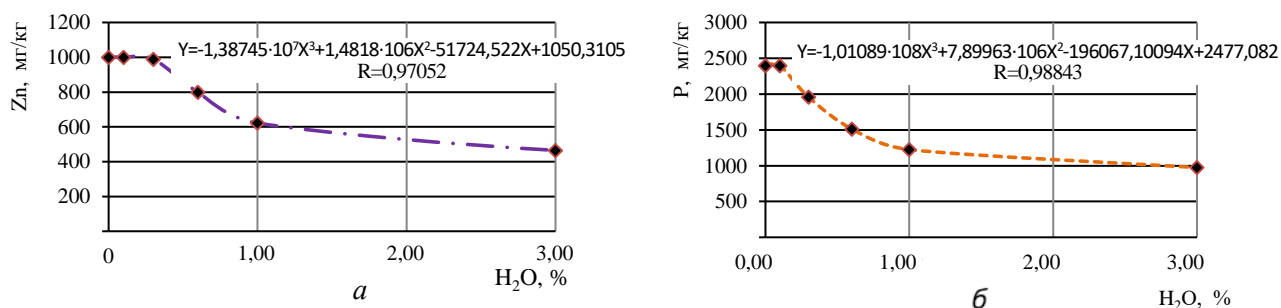


Рисунок 11 – Зависимости содержания элементов-индикаторов присадок от концентрации воды:

*a* – массовой доли цинка (Zn); *б* – массовой доли фосфора (P)

Снижение содержания цинка и фосфора свидетельствует о том, что вода оказывает понижающее воздействие на содержание антиокислительной присадки.

На рисунке 12 представлена графическая зависимость изменения щелочного числа от концентрации воды.

Высокощелочные сульфаты и фосфаты металлов, составляющие основу присадок, определяют щелочное число. Последнее характеризует содержание пакета присадок в комплексном понимании. Вода оказывает понижающее воздействие на щелочное число, что адекватно согласуется со снижением содержания элементов-индикаторов.

В связи со снижением содержания элементов-индикаторов присадок и законом сохранения массы вещества при всех природных и искусственных процессах встала задача, заключающаяся в поиске элементов-индикаторов внутри системы.

На рисунке 13 представлены отделённые с помощью шприцев образцы донного аналитического осадка.

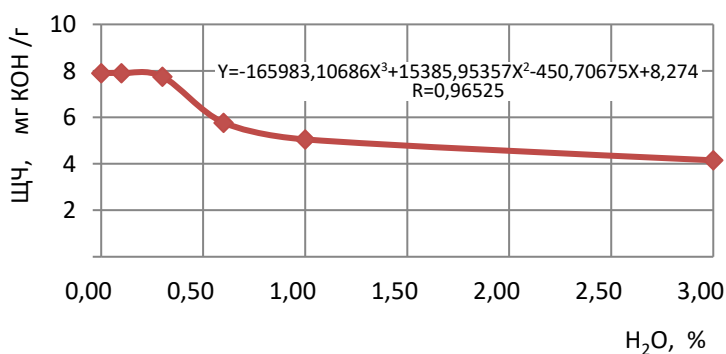


Рисунок 12 – Зависимость щелочного числа от концентрации воды

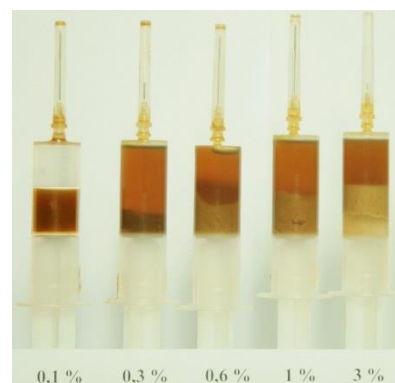


Рисунок 13 – Образцы аналитического осадка

Образцы аналитического осадка высушили в муфельной печи до образования лакоподобного слоя. Поверхность высушенной пробы представляет собой хаотично расположенные возвышенности и впадины различных форм и размеров. Цвет поверхности чёрный с характерным металлическим отблеском.

Результаты поиска элементов-индикаторов присадок методом растровой электронной микроскопии представлены на рисунке 14 в виде микрофотографии с фазовым анализом и диаграммой содержания элементов-индикаторов в пробе. В таблицу 1 сведены численные значения массовых и атомных долей элементов твёрдой фазы осадка.

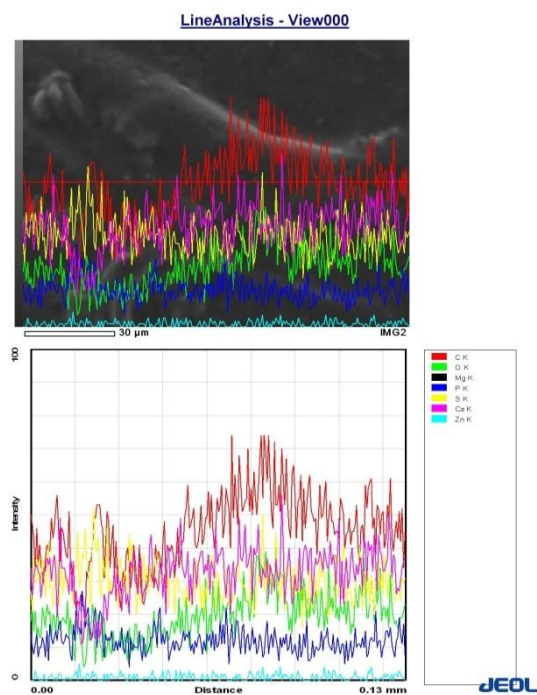


Рисунок 14 – Диаграмма фазового анализа высушенной пробы осадка

Таблица 1 – Массовый и атомный составы элементов твердой фазы осадка

Элемент-индикатор	Массовая доля, %	Атомная доля, %
C	60,18	90,29
O	16,12	–
Na	0,27	0,09
Mg	0,19	0,13
P	1,6	0,43
S	5,79	3,25
Ca	11,79	5,29
Zn	0,41	0,11
Pb	3,58	0,3

Результаты эксперимента позволили сделать следующие выводы:

1. Методом атомной эмиссионной спектроскопии определены зависимости содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) и зависимость щелочного числа от концентрации воды в товарном масле. При этом установлено:

- снижение содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) водомасляной смеси свидетельствует о снижении концентрации самих присадок под воздействием воды и, как следствие, снижении свойств моторных масел;

- концентрация воды 0,1 % является отправной точкой активного спада содержания элементов-индикаторов присадок и щелочного числа;

- существует корреляционная зависимость между контролируемыми параметрами.

2. Методом растровой электронной микроскопии донного осадка обводнённого моторного масла найдены и идентифицированы элементы-индикаторы присадок, вводимых блендингом, при его производстве (кальций,

магний, цинк, фосфор). Определён массовый и атомный составы элементов-индикаторов, а также их оксидов.

3. Снижение концентрации элементов-индикаторов присадок в масле адекватно согласуется с их выявлением в осадке и выходом из объёма масла. На примере композиционного пакета присадок подтверждена гипотеза связующего влияния водного конденсата на продукты низкой агрегатной устойчивости.

**В пятой главе** в результате обобщения теоретических и экспериментальных исследований разработаны решения по совершенствованию процессов, направленных на минимизацию активности поступления топливных фракций и водного конденсата в смазочную систему.

Наиболее активное поступление топливных фракций происходит при пуске двигателя, особенно в режиме стартерного вращения коленчатого вала без реализации действительного цикла. В таких условиях важно получить успешную реализацию действительного цикла непосредственно в начале стартерного вращения коленчатого вала.

*Тепловой аккумулятор фазового перехода индукционного типа.* Для успешного пуска требуется тепловая подготовка. Применение теплового аккумулятора фазового перехода индукционного типа (ТАФПИТ) обеспечит совершенствование теплообменных процессов, окажет позитивное влияние на полноту сгорания топлива и активность поступления топливных фракций в смазочную систему при пусковых режимах. ТАФПИТ саморазряжается при продолжительном времени покоя двигателя, но сохраняет работоспособность, так как конструктивно включает в себя индукционное устройство. В качестве примера на рисунке 15 представлена схема теплового аккумулятора фазового перехода индукционного типа.

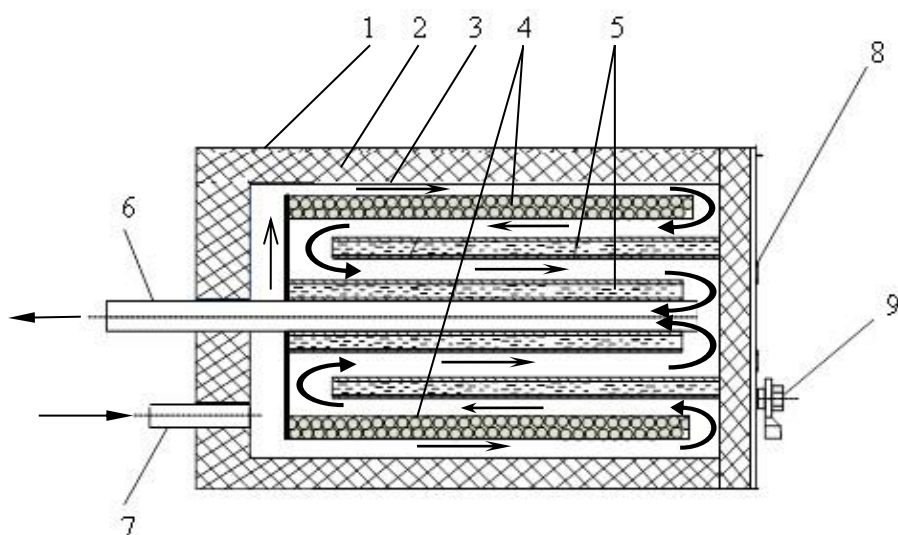


Рисунок 15 – Тепловой аккумулятор фазового перехода индукционного типа:

1 – наружный корпус; 2 – тепловая изоляция; 3 – внутренний корпус; 4 – обмотка индукционная; 5 – медные цилиндрические капсулы с теплоаккумулирующим материалом; 6 – выходной патрубок; 7 – входной патрубок; 8 – крышка из диэлектрического материала; 9 – ввод электропитания

На основе законов электромагнитной индукции разработана методика определения мощности индукционного устройства в зависимости от условий применения.

В основу разработки методики положена аксиально-симметричная модель. Цели создания модели – определение мощности индукционного устройства в зависимости от условий применения и создание возможности теоретического представления совокупности физических процессов, происходящих в системе двигателя и ТАФПИТ. Достоинством такой формы является приспособленность к условиям активного теплообмена, широким диапазонам температур, мощностей индукционной катушки с учётом циркуляционной производительности теплоносителя, массоматериальных и теплоёмкостных значений конструкционных материалов.

В качестве исходных данных учитываются конструкционные и эксплуатационные материалы, входящие в систему двигателя, их массы и теплоёмкости, температурные условия, лучистый и конвективный теплообмены с окружающей средой, характер распределения тепла по всей системе двигателя. Аксиально-симметричная модель позволяет максимально приблизить физико-математическое описание к реальным процессам и получить объективные значения, даёт теоретическое представление о «внутреннем механизме» теплообменных превращений и является хорошим инструментом познавательной деятельности.

На рисунке 16 показано теоретическое представление совокупности физических процессов, происходящих в системе двигателя и ТАФПИТ, посредством аксиально-симметричной модели. В верхней части каждой иллюстрации описывается тепловое состояние ТАФПИТ, в нижней части описывается тепловое состояние двигателя. Время, реализуемое на изменение теплового состояния настоящей системы, разбито на 10-ти минутные интервалы. В качестве теплоносителя выбран антифриз системы охлаждения, обладающий максимальной теплоёмкостью, чем обеспечивается удобство (наглядность) при реализации методики, а также определяющий

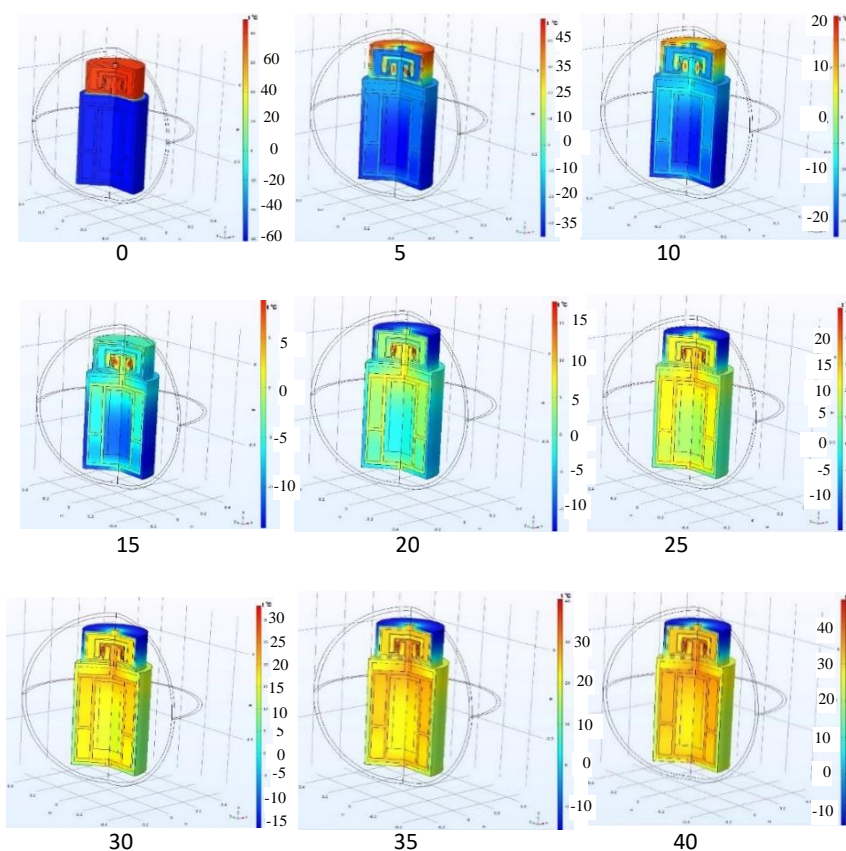


Рисунок 16 – Временная реализация модели теплового состояния двигателя и теплового аккумулятора фазового перехода индукционного типа

активность образования подвергшихся термической деструкции и частично окисленных топливных фракций, поступающих в смазочную систему. Результаты расчётов сведены в таблицу 2, куда сведены численные значения времени, потребного на достижение теплоносителем температуры плюс 44 °С, на примере двигателя КамАЗ-740.30 при различных температурных условиях и мощностях индукционного устройства с объёмом теплоаккумулирующего материала 6 л.

Таблица 2 – Время, потребное на достижение теплоносителем температуры плюс 44 °С, на примере двигателя КамАЗ-740.30

Температурные условия, °С	– 60	– 50	– 40	– 30	– 20	– 10
	Время тепловой подготовки, мин					
Мощность индукционного устройства, кВт						
3,62	> 80	> 80	> 80	> 80	70	55
8,15	55	47	40	33	27	21
14,49	27	24	21	18	14	12
22,64	17	14	13	11	9	7
32,6	11	10	8	6	5.5	4

*Газоэлектрофакельное устройство (ГЭФУ).* В целях повышения пусковых качеств штатно в системах питания воздухом применяются электрофакельные устройства, работающие на основе сжигания дизельного топлива. Рассматривается возможность совершенствования теплообменных, физико-химических процессов на основе применения газовых топлив. Такие топлива имеют лёгкий фракционный состав, не требуют смены фазовых состояний, что позитивно влияет на полноту сгорания и активность поступления топливных фракций в смазочную систему.

В целях проверки настоящей гипотезы провели эксперимент. Для достоверности результатов эксперимента выбрано 10 двигателей КамАЗ-740.10. Суть эксперимента заключалась в подаче разных видов топлив в штатные свечи электрофакельных устройств и определении температур впускного (поточного) воздуха в дизельной и газовой сериях с помощью термопреобразователей, установленных в цилиндрические отводы, как показано на рисунке 17. Нумерация термопреобразователей, установленных в цилиндрические отводы, соответствовала нумерации цилиндров. Окружностями красного цвета обозначены места установки свечей ЭФУ. Остекление коллекторов обеспечивало визуализацию факела. Замеры температур осуществлялись с периодичностью 7,5 с (8 замеров) в течение 60 с стартерного режима вращения коленчатого вала и столько же в течение 60 с в режиме реализации действительного цикла непосредственно после пуска. Электрофакельное устройство, работающее на основе сжигания газового топлива, названо газоэлектрофакельным устройством (ГЭФУ). В эксперименте использовалось топливо, именуемое «пропан автомобильный».

В результате проведённого эксперимента на каждой группе номерных цилиндрических отводов произведено 80 замеров на двух режимах вращения коленчатого вала. С учётом количества режимов сто шестьдесят замеров

пришлось на группу каждого номерного отвода только в одной топливной серии. С учётом двух серий каждая номерная группа подверглась 320 измерениям, а с учётом количества цилиндров двигателя КамАЗ-740.10 (восемь штук) массив данных всего эксперимента состоял из 2560 численных значений температур. Каждая топливная серия представляла собой генеральную совокупность выборок.

По результатам замеров выведены среднеарифметические значения и построены графические зависимости температур впускного воздуха от времени вращения коленчатого вала в стартерном режиме и в режиме реализации действительного цикла, в дизельной и газовой сериях представленные на рисунке 18.

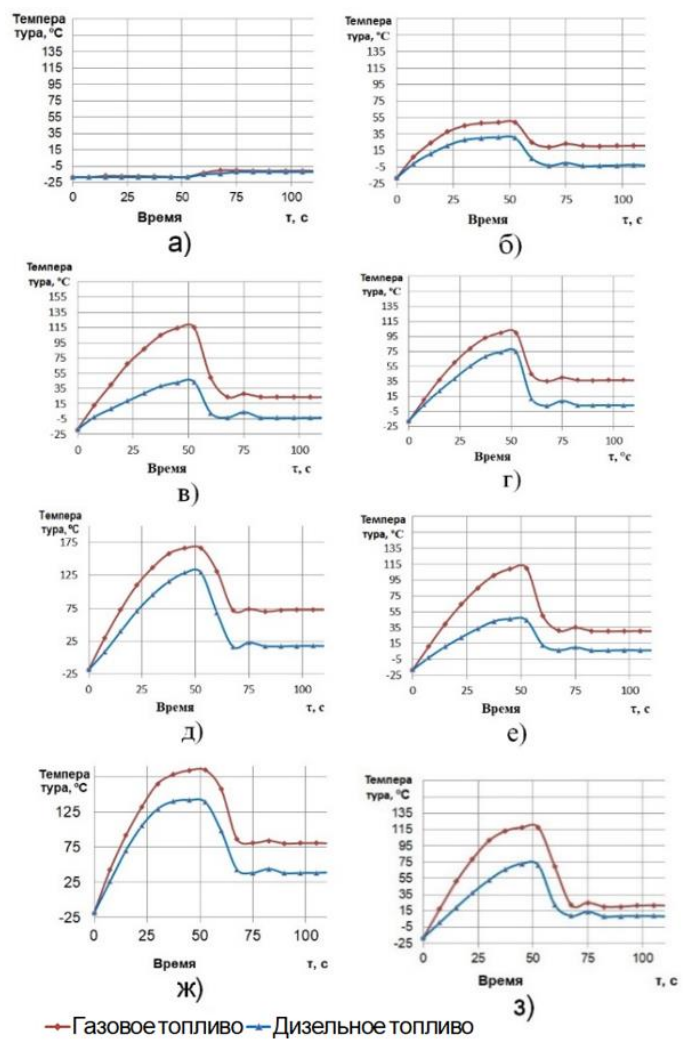
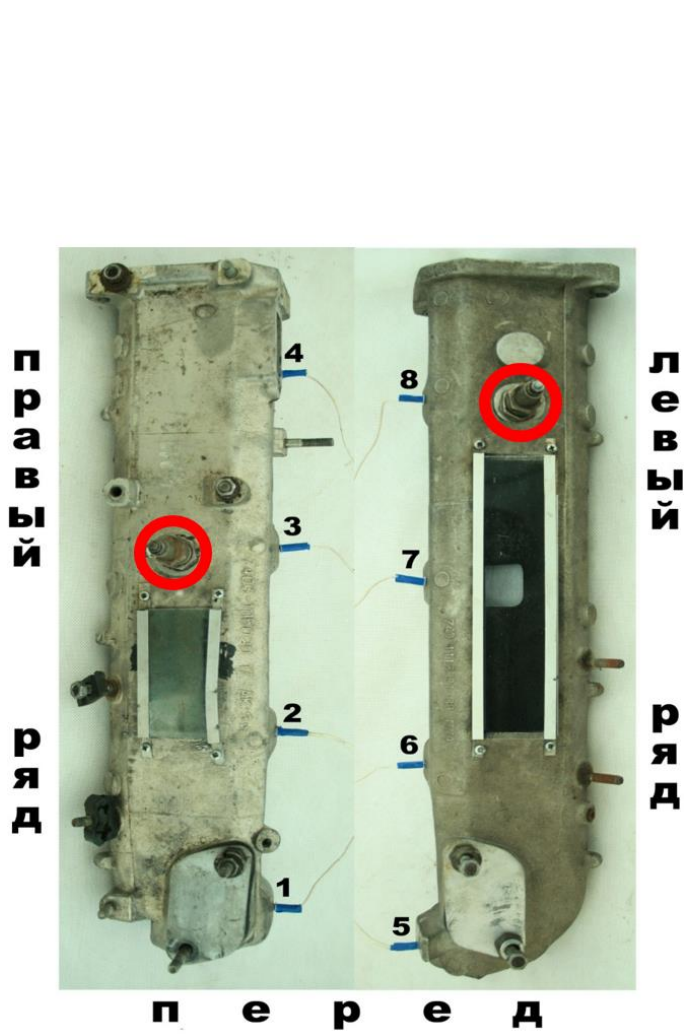


Рисунок 18 – Локально размещённые в соответствии с номинацией и расположением цилиндров двигателя КамАЗ-740.10 графические зависимости температур впускного воздуха в цилиндрических отводах применительно к дизельной и газовой сериям, в режиме стартерного вращения коленчатого вала и в режиме реализации действительного при низкотемпературном пуске: а) - четвёртого цилиндра; б) - восьмого цилиндра; в) - третьего цилиндра; г) - седьмого цилиндра; д) - второго цилиндра; е) - шестого цилиндра; ж) - первого цилиндра; з) - пятого цилиндра.

Рисунок 17 – Термопреобразователи сопротивления платиновые ТСП 0501-01, установленные в цилиндрические отводы остеклённых впускных коллекторов, пронумерованные в соответствии с нумерацией цилиндров: 1 - первого цилиндра; 2 - второго цилиндра; 3 - третьего цилиндра; 4 - четвёртого цилиндра; 5 - пятого цилиндра; 6 - шестого цилиндра; 7 - седьмого цилиндра; 8 - восьмого цилиндра.

В результате эксперимента установлено, что теплотворная способность газозлектрофакельного устройства в таких условиях преобладает над теплотворной способностью штатного электрофакельного устройства во всех цилиндрических отводах (за исключением четвёртого цилиндра). Последнее объясняется конструктивной особенностью впускных коллекторов правого ряда цилиндров, изображённых на рисунке 17, расположением свечи ЭФУ относительно цилиндрических отводов, направлением движения впускного (поточного) воздуха, не обеспечивающего в частном случае подачу тепла в цилиндрический отвод.

Введение газозлектрофакельного устройства в рабочий процесс двигателя КамАЗ-740.30 позволило повысить среднюю температуру впускного воздуха в 1,7 раза по отношению к штатным условиям, в чём проявляется позитивная тенденция к повышению полноты сгорания топлива и снижению активности поступления топливных фракций в смазочную систему на пусковых режимах. Определены минимальные температуры успешного пуска с применением настоящих устройств без тепловой подготовки двигателей при прочих равных условиях. С использованием электрофакельного устройства температура составила минус 21 °С. В то же время применение газозлектрофакельного устройства обеспечило успешный пуск при минимальной температуре минус 25 °С, что на 4 °С ниже значения, соответствующего штатному устройству. После поджига осуществляли отключение электроэнергии. Снятие напряжения с нагревательного элемента свечи не влияло на работу газозлектрофакельного устройства.

*Автоматически управляемая приточно-нагреваемая система вентиляции картера.* В целях снижения активности конденсационных (десублимационных) процессов и снижения температуры точки росы разработана конструкция автоматически управляемой приточно-нагреваемой системы вентиляции картера. Поступление изначально холодного воздуха позитивно влияет на массовое влагосодержание конечной смеси газов в картерном пространстве, а его нагрев обеспечивает повышение давления насыщения. Схема автоматически управляемой приточно-нагреваемой системы вентиляции картера и расчётная графическая зависимость влияния производительности нагнетателя на влагосодержание смеси газов в определённых условиях представлена на рисунке 19.

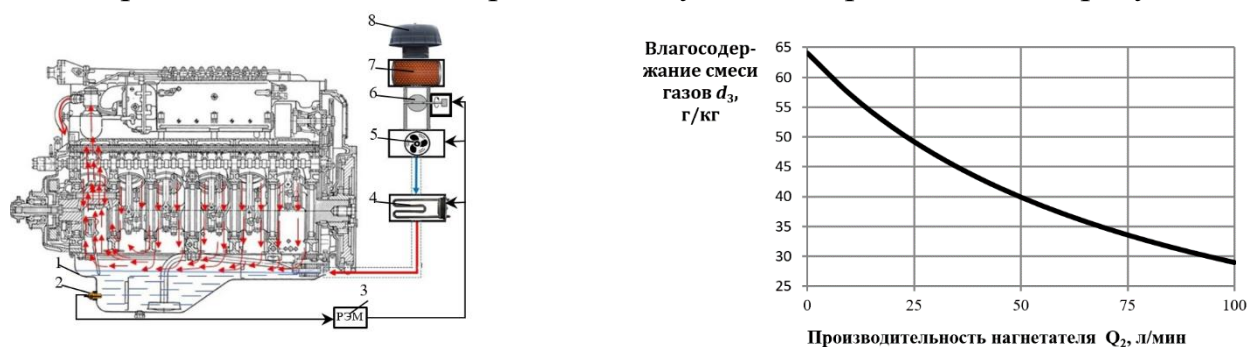


Рисунок 19 – Схема автоматически управляемой приточно-нагреваемой системы вентиляции картера и графическая зависимость влияния производительности нагнетателя на влагосодержание смеси газов при расходе картерных газов  $Q=83$  л/мин, влагосодержании  $d_1=64$  г/кг сухих газов и температуре окружающего воздуха минус 32 °С:

- 1 – поддон картера; 2 – термореле; 3 – реле электромагнитное; 4 – нагреватель;  
5 – нагнетатель; 6 – заслонка; 7 – фильтр; 8 – воздухозаборник

Влагосодержание смеси газов в картерном пространстве будет определяться пятью факторами и выразится следующей зависимостью:

$$d = d_3 + \frac{Q_1 \cdot d_1 + Q_2 \cdot d_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (14)$$

где  $Q_1$  – расход картерных газов;  $Q_2$  – производительность нагнетателя;  $d_1$  – влагосодержание картерных газов;  $d_2$  – влагосодержание атмосферного воздуха;  $d_3$  – влагосодержание воздуха.

Относительная влажность  $\varphi$ , выраженная в %, определится из отношения парциального давления к давлению насыщения:

$$\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_s} \cdot 100. \quad (15)$$

Парциальное давление в свою очередь определится следующей математической зависимостью:

$$p_{H_2O} = \frac{p \cdot d}{662 + d}, \quad (16)$$

где  $d$  – влагосодержание газов, г/кг с.г.;  $p$  – давление, Па.

Давление насыщения выразится следующим произведением:

$$p_s = n \cdot k \cdot T, \quad (17)$$

где  $n$  – концентрация молекул;  $k$  – постоянная Больцмана  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К;  $T$  – температура, К.

Низкая концентрация паров воды в холодном атмосферном воздухе, нагнетаемом приточно-нагреваемой системой, оказывает понижающее воздействие на влагосодержание смеси газов. Отрицательные температуры оказывают осушающее воздействие на атмосферный воздух, нагнетаемый в картерное пространство. Чем ниже температура окружающего воздуха, тем ниже его влагосодержание и выше его способность оказывать осушающее воздействие на смесь газов в картерном пространстве.

Температура точки росы, измеряемая в °С, соответствует состоянию насыщения при заданном значении влагосодержания или парциальном давлении и определяется зависимостью:

$$t_p = \frac{233,77 \cdot \ln p_{H_2O} + 115,72}{16,57 - 0,99 \ln p_{H_2O}}. \quad (18)$$

Численные значения параметров смесей газов в картерном пространстве на примере двигателя КамАЗ-740.30, определённые в зависимости от производительности нагнетателя при расходе картерных газов  $83 \text{ дм}^3/\text{мин}$ , их влагосодержании  $64 \text{ г/кг}$  и температуре окружающего воздуха минус  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Численные значения параметров смесей газов в картерном пространстве двигателя КамАЗ-740.30 при определённых условиях

Производительность нагнетателя, $\text{дм}^3/\text{мин}$	0	20	40	60	80	100	120	140
Суммарная производительность, $\text{дм}^3/\text{мин}$	83	103	123	143	163	183	203	223
Влагосодержание, г/кг с.г.	64,0	51,6	43,2	37,1	32,5	29,0	26,2	23
Парциальное давление, Па	9513	8695	7424	6486	5684	5052	4512	3567
Температура точки росы, $^{\circ}\text{C}$	44	43	40	37,5	35,1	33	31	27,5

*Способ ультразвуковой очистки поверхностей картерного пространства.*

Для снижения негативного влияния отрицательных температур на состояние смазочных систем разработан способ ультразвуковой очистки поверхностей картерного пространства, обеспечивающий совершенствование массообменных процессов за счёт разрыхления, отрыва и удаления отложений, образующихся в результате тепло- и массообменных, физико-химических процессов, порождаемых отрицательными температурами. Ультразвук инициирует образование кавитационного кластера в жидкости. На рисунке 20 представлена схема ультразвуковой очистки поверхностей картерного пространства на примере двигателя КамАЗ-740.10.

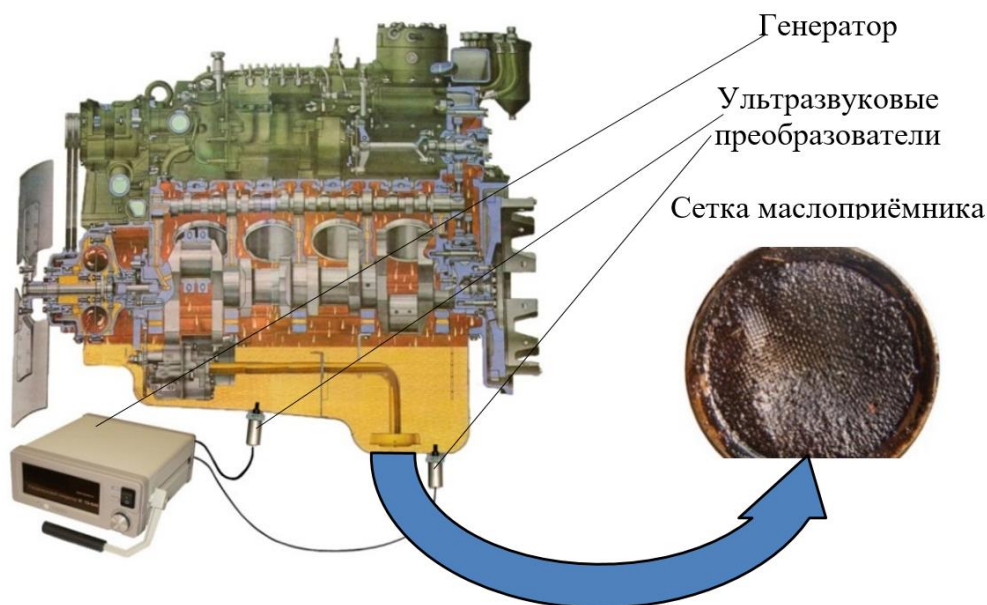


Рисунок 20 – Схема ультразвуковой очистки поверхностей картерного пространства на примере двигателя КамАЗ-740.10

Образование кавитационных пузырьков происходит в результате локальных перепадов давлений, при снижении давления ниже давления насыщения. Акустическая кавитация представляет собой эффективный механизм концентрации энергии.

Механизм кавитационного воздействия объясняется образованием в месте схлопывающихся пузырьков гидравлических ударов, где кинетическая энергия

жидкости переходит в упругую потенциальную энергию. Возникшая из-за этого неравновесная структура порождает ударные волны и кумулятивные струи. Кумулятивные струи разрушают поверхностные слои за счет кинетической энергии жидкости. В результате озвучивания технологической среды происходят разрыхление, отрыв, удаление, диспергирование, гомогенизация в масле низкотемпературных отложений.

Основными параметрами, характеризующими эффективность кавитационного воздействия, являются амплитуда, частота и индекс кавитации  $K$ . Индекс кавитации – это мера пространственной плотности потенциальной энергии в кавитационном кластере, он определяется как отношение объема кавитационных пузырьков  $\Delta V$  к объему жидкости  $V$ , в котором локализован кластер:

$$K = \frac{\Delta V}{V} . \quad (19)$$

Механизм кавитации предусматривает образование зародышей пузырьков радиусом  $R_0$  и их развитие, заключающееся в увеличении размера до момента начала схлопывания  $R_{\max}$ . Зародыши склонны к образованию вблизи твёрдых поверхностей.

Концентрация схлопывающимися кавитационными пузырьками акустической энергии и трансформация мощности приводят к возникновению высоких локальных давлений и температур. Если пренебречь теплообменом между пузырьком и окружающей жидкостью по причине короткого временного периода схлопывания, считая этот процесс адиабатическим, можно получить математические зависимости, описывающие давление  $P$  и температуру  $T$  парогазовой смеси внутри схлопывающегося кавитационного пузырька:

$$P = P_0 \left( R_{\max} / R_0 \right)^{3\gamma} ; \quad (20)$$

$$T = T_0 \left( R_{\max} / R_0 \right)^{3(\gamma-1)} , \quad (21)$$

где  $P_0$  и  $T_0$  – давление и температура парогазовой смеси внутри пузырька в начале схлопывания при  $t = 0$ ;  $R_{\max}$  – максимальный радиус пузырька;  $R_0$  – начальный радиус пузырька;  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Максимальный размер кавитационного пузырька зависит от коэффициента поверхностного натяжения, гидростатического давления, давления насыщенных паров, начального размера пузырька. Максимальный размер пузырька описывается следующей математической зависимостью:

$$R_{\max} = \sqrt{3R_0} \sqrt{\frac{R_0}{2\sigma} \left( P_{\text{ст}} - P_{\text{п}} + \frac{2\sigma}{R_0} \right)} , \quad (22)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $P_{\text{ст}}$  – гидростатическое давление;  $P_{\text{п}}$  – давление насыщенных паров.

Размеры кавитационных пузырьков достигают  $2 \times 10^{-10}$  м, давление в момент схлопывания достигает 100 МПа, а температура – более 1000 К. На рисунке 21 показано возможное изменение формы пузырька в момент схлопывания вблизи твёрдой поверхности в соответствии со струйной теорией.

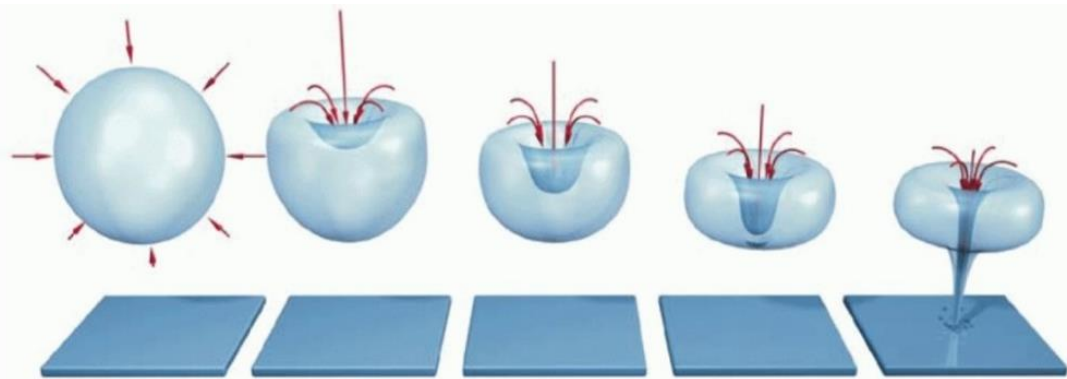


Рисунок 21 – Изменение формы кавитационного пузырька в момент схлопывания вблизи твёрдой поверхности

В рамках научного обоснования проведён эксперимент. Эксперимент заключался в определении разницы масс одной порции масла, заправленного в смазочную систему, до осуществления ультразвуковой технологической операции и после. В качестве озвучиваемой (технологической) среды применялось индустриальное масло марки И-8А. В качестве подопытного автомобиля использовался автомобиль марки КамАЗ-53215 с двигателем КамАЗ-740,30 с наработкой 112000 км с начала эксплуатации. Технологические режимы оборудования представлены частотой 20000 Гц и амплитудой 2,5 мкм. Время озвучивания – 20 мин. Относительно небольшое озвучивание технологической среды привело к увеличению массы индустриального масла. Увеличение массы объясняется воздействием ультразвука на отложения, находящиеся на поверхностях картерного пространства. Их разрыхление, отрыв и перемещение в объём привело к увеличению массы индустриального масла на 32 г.

### **Перспективы развития темы:**

Дальнейшее развитие темы возможно по нескольким направлениям:

1. Совершенствование рабочих процессов в системах и механизмах, разработка конструкций, специфично ориентированных на условия отрицательных температур, с целью повышения надежности и экологичности поршневых двигателей, а также создание вспомогательного оборудования в составе объектов применения.
2. Разработка передовых рецептурных технологий на основе импортозамещённых присадок по производству моторных масел, приспособленных к условиям отрицательных температур.
3. Разработка передовых технологий, направленных на совершенствование систем управления, регулирования, мониторинга технического состояния, диагностирования и контроля показателей функционирования поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования.
4. Результаты научных исследований по влиянию отрицательных температур на состояние смазочных систем, описанные в настоящей работе, распространяются на дизельные, бензиновые и газовые двигатели.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Результаты исследований, обобщённые в диссертационной работе, направлены на совершенствование рабочих процессов в смазочных системах поршневых двигателей применительно к условиям отрицательных температур. Совокупность теоретических положений, экспериментов и технических решений направлена на решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Цель по системному совершенствованию тепло- и массообменных, физико-химических процессов в смазочных системах поршневых двигателей автотранспортных средств в условиях отрицательных температур достигнута.

Основные научно-практические результаты:

1. Установлено, что факторами, снижающими жизненный цикл двигателя и обеспечивающими причинно-следственные связи между отрицательными температурами и состоянием смазочных систем, являются конденсационные процессы паров воды и процессы активного накопления частиц сажи, топливных фракций, а также процессы усиления межмолекулярных взаимодействий продуктов с низкой агрегатной устойчивостью с образованием отложений. Разработана схема механизма низкотемпературного осадкообразования.

2. Разработана математическая модель конденсационного процесса в цилиндре, отличающаяся приспособленностью к поршневым двигателям и позволяющая итерационно, на основе разниц парциальных давлений и плотности потока массы водного конденсата определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя. На примере двигателя КамАЗ-740.30 при заданных условиях расчётная масса водного конденсата составила 2,9 г.

3. Разработана математическая модель конденсационного процесса в картерном пространстве, отличающаяся регрессионной зависимостью, учитывающей расход картерных газов от температуры охлаждающей жидкости, и позволяющая итерационно, на основе разниц начального и конечного влагосодержаний картерных газов определять массовое количество воды по смене агрегатного состояния за период прогрева двигателя. На примере двигателя КамАЗ-740.30 прирост расчётного влагосодержания масла в период прогрева составил 5,2 г, что соответствует 0,0173 % по массе.

4. Экспериментально на примере двигателя КамАЗ-740.30 определена зависимость расхода картерных газов от температуры охлаждающей жидкости, а также зависимость массовых накоплений водного конденсата в смазочной системе от температуры газов по влагосодержанию масла при прогреве в условиях отрицательных температур. При этом установлено:

- при температуре минус 32 °С расход картерных газов в 1,3 раза превышает значение номинального температурного режима;
- начальное содержание воды в масле составляло 160 ppm, что соответствует 0,016 % по массе, или 4,8 г;
- максимальный прирост влагосодержания составил 178 ppm, что соответствует 0,0178 % по массе, или 5,3 г;

- экстремум кривой зависимости достиг значения 338 ppm, что соответствует 0,0338 % по массе, или 10,1 г.

Многokратные периодические обводнения в условиях отрицательных температур суммарно оказывают негативное влияние на состояние всей системы.

5. Определены зависимости содержания элементов-индикаторов присадок (кальций, магний, цинк, фосфор) и зависимость щелочного числа от концентрации воды в товарном масле. При этом установлено:

- вода оказывает понижающее воздействие на контролируемые параметры моторного масла;

- концентрация воды 0,1 % является отправной точкой активного спада содержания элементов-индикаторов присадок и щелочного числа;

- существует корреляционная зависимость между контролируемыми параметрами.

6. Найдены и идентифицированы элементы-индикаторы присадок (кальций, магний, цинк, фосфор), а также их оксиды в осадке обводнённого товарного масла, определены массовые и атомные доли. Подтверждена гипотеза осадкообразующего влияния водного конденсата на продукты низкой агрегатной устойчивости.

7. На основе анализа работ, статистических данных, теоретических положений и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по мониторингу и диагностике состояния смазочных систем поршневых двигателей автотранспортных средств, а также следующие решения по совершенствованию тепло- и массообменных, физико-химических процессов применительно к условиям отрицательных температур:

- методика определения мощности индукционного устройства теплового аккумулятора фазового перехода индукционного типа, обеспечивающего высокоэнергоэффективную тепловую подготовку, чем позитивно влияющего на полноту сгорания топлива и активность поступления топливных фракций в смазочную систему при пусковых режимах; на основе методики разработана таблица численных значений мощностей и временных продолжительностей тепловой подготовки двигателя КамАЗ-740.30 в зависимости от температурных условий;

- применение газозлектрофакельного устройства, позволяющего повысить температуру впускного воздуха на режимах пуска, обеспечивая тем самым повышение полноты сгорания топлива и снижение активности поступления топливных фракций в смазочную систему; экспериментальное введение газозлектрофакельного устройства в рабочий процесс двигателя КамАЗ-740.10 позволило повысить температуру впускного воздуха в 1,7 раза по отношению к штатным условиям; определены минимальные температуры успешного пуска с применением настоящих устройств без тепловой подготовки двигателей при прочих равных условиях – с использованием электрофакельного устройства температура составила минус 21 °С, в то же время применение газозлектрофакельного устройства обеспечило успешный пуск при минимальной температуре минус 25 °С, что на 4 °С ниже значения,

соответствующего штатному устройству; после поджига снятие напряжения с нагревательного элемента свечи не влияло на работу газозлектрофакельного устройства;

- автоматически управляемая приточно-нагреваемая система вентиляции картера, обеспечивающая снижение активности конденсационных процессов за счёт повышения давления насыщения, снижения парциального давления и температуры точки росы смеси газов нагнетанием нагреваемого низкотемпературного воздуха в картерное пространство; на примере двигателя КамАЗ-740.30 разработана таблица численных значений параметров смеси газов в зависимости от технических характеристик системы;

- ультразвуковой технологический процесс, обеспечивающий безразборное разрыхление, отрыв и удаление отложений с поверхностей картерного пространства; экспериментальное озвучивание масла в картере двигателя КамАЗ-740.30 увеличило массу технологической среды на 32 г.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по специальности:**

1. Колунин, А.В. Влияние обводнения на содержание присадок в моторных маслах / А.В. Колунин, С.В. Корнеев, Д.Н. Пилипенко // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 12. – С. 21–22.

2. Колунин, А.В. Особенности эксплуатации техники в условиях низких температур / А.В. Колунин, С.В. Корнеев, Д.Н. Пилипенко // Вестник Павлодарского университета. – 2005. – № 2. – С. 293–295.

3. Колунин, А.В. Обводнение и коллоидная стабильность моторных масел / А.В. Колунин, В.М. Дудкин, С.В. Корнеев // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 4. – С. 33–34.

4. Колунин, А.В. Влияние условий эксплуатации автомобилей на ресурс работы моторного масла / А.В. Колунин, И.И. Ширлин, А.А. Иванников // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 4(32). – С. 42–45.

5. Колунин, А.В. Ресурс масла как показатель, зависящий от условий эксплуатации техники / А.В. Колунин, С.А. Гельвер, И.И. Ширлин, А.Д. Гедзь // Омский научный вестник. – 2013. – № 3(123). – С. 141–144.

6. Колунин, А.В. Влияние температурного режима работы двигателя КамАЗ-740 на влагосодержание масла при прогреве в условиях низких температур / А.В. Колунин, С.В. Белокопытов, А.Б. Марков и др. // Двигателестроение. – 2014. – № 4. – С. 43–45.

7. Колунин, А.В. Методика исследования осадка обводненного работающего масла М8Г2к / А.В. Колунин, А.И. Блесман, Д.А. Полонянкин и др. // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 98–101.

8. Колунин, А.В. Изменение температурного состояния двигателя КамАЗ-740 при прогреве в условиях низких температур / А.В. Колунин, С.А. Гельвер, А.Д. Гедзь, А.Д. Марков и др. // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 95–98.

9. Колунин, А.В. Процесс обводнения работающего масла при прогреве двигателя КамАЗ-740 в условиях отрицательных температур / А.В. Колунин, С.А. Гельвер, С.В. Белокопытов // Вестник СибАДИ. – 2015. – № 3 (43). – С. 7–11.

10. Колунин, А.В. О влиянии воды на эксплуатационные свойства тепловозных моторных масел / А.В. Колунин, С.А. Гельвер // Транспорт Урала. – 2018. – № 3. – С. 77–82.

11. Колунин, А.В. Изменение концентрации присадок в условиях обводнения масел поршневых тепловозных двигателей / А.В. Колунин, С.А. Гельвер, И.А. Бурьян // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3. – С. 85–92.

12. Колунин, А.В. О температурном состоянии двигателя, прогреваемого в условиях отрицательных температур холодного климата / А.В. Колунин, И.А. Бурьян, О.В. Новиков // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 69–73.

13. Колунин, А.В. Влияние температурного состояния поршневого двигателя на расход картерных газов / А.В. Колунин, И.А. Бурьян // Двигателестроение. – 2019. – № 4. – С. 29–31.

14. Колунин, А.В. Физико-химический анализ обводнённого моторного масла / А.В. Колунин // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – № 2. – С. 141–148.

15. Колунин, А.В. Химический анализ осадка обводнённого моторного масла / А.В. Колунин // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – № 4. – С. 287–292.

16. Колунин, А.В. Математическая модель конденсационного процесса в цилиндре поршневого двигателя / А.В. Колунин, С.Е. Лазарев, В.Н. Каминский и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2023. – № 5 (90). – С. 395–404.

17. Колунин, А.В. Обоснование применимости теплового аккумулятора фазового перехода в тепловой подготовке двигателей автотранспортных средств / А.В. Колунин, В.Н. Каминский, Д.В. Апельинский [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – № 1 (91). – С. 55–64.

18. Колунин, А.В. Перспективные особенности тепловых аккумуляторов двигателей наземных транспортных средств / А.В. Колунин. // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – № 3 (92). – С. 232–239.

**Статьи, индексируемые в библиографической и реферативной базе данных Scopus и (или) Web of Science:**

19. Kolunin, A.V. Water Contamination and Colloidal Stability of Motor Oils / V.M. Dudkin, S.V. Korneev, A.V. Kolunin // Chemistry and technology of fuels and oils. Tom 42. No. 4 New York. Published by Springer New York Consultants Bureau ISSN : 0009-092eISSN : 1573-8310. pp. 273-275.

20. Kolunin, A.V. Heat storage as a means to improve the starting reliability of piston engines at below zero temperatures / A.V. Kolunin, D.V. Terzi, Ya.V. Altuhov, I.A. Bur'yan // AIP Conf. Proc. 2141, 050011-1–050011-6 ; Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1884-4/S30.00. Published 28 August 2019.

21. Kolunin, A.V. Influence of the Arctic climate on watering of engine oils in operating conditions of road transport / A.V. Kolunin, I.A. Bur'yan, S.A. Gel'ver //

IOP Publishing IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conf. Series1260 (11 2019) 062012. Mechanical Science and Technology Update  
doi : 10.1088/1742-6596/1260/6/062012.

22. Kolunin, A.V. Mathematical model of the condensation process in the crankcase space of a piston engine warmed up under negative temperatures of a cold climate / A.V. Kolunin, V.N. Kaminsky, A.V. Kostyukov, I.V. Materi // IOP Publishing IOP Conf. Series : Journal of Physics. 2021.

23. Kolunin, A.V. The use of light fractional composition fuels in the electric flame jet of a diesel engine / A.V. Kolunin, V.N. Kaminsky, A V Kostyukov and I.V. Materi // IOP Publishing IOP Conf. Series : Journal of Physics. 2021.

#### **Монографии:**

24. Колунин, А.В. Экспериментальные исследования влияния воды на эксплуатационные свойства моторных масел, применяемых в поршневых автомобильных двигателях / А.В. Колунин, С.В. Корнеев, А.А. Смолин [и др.] – Омск : Омский автобронетанковый инженерный институт, 2016. – 100 с.

#### **Статьи в материалах конференций и других изданиях:**

25. Колунин, А.В. Влияние температурного режима работы двигателя КамАЗ-740 на влагосодержание масла при прогреве в условиях низких температур / А.В. Колунин, С.В. Белокопытов, А.Д. Марков // Наука и военная безопасность. – 2015 – №3 (3). – С.112–115.

26. Колунин, А.В. Влияние отрицательных температур арктического климата на состояние смазочных систем поршневых двигателей / А.В. Колунин, С.С. Поярков, А.С. Шудыкин [и др.] // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы : проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов III Международной научно-практической конференции. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2018. – С. 102–107.

27. Колунин, А.В. Особенности применения масел поршневых двигателей в условиях арктического климата / А.В. Колунин, Д.В. Терзи, Я.В. Алтухов и др. // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : IX Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2019. – С. 179–180.

28. Колунин, А.В. Тепловой аккумулятор как средство повышения пусковой надёжности поршневых двигателей в условиях отрицательных температур / А.В. Колунин, Я.В. Алтухов, Д.В. Терзи и др. // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : IX Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2019. – С. 92–93.

29. Колунин, А.В. Влияние арктического климата на обводнение моторных масел в условиях эксплуатации автомобильного транспорта / А.В. Колунин, И.А. Бурьян, С.А. Гельвер // Проблемы машиноведения : III Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 65–71.

30. Колунин, А.В. Математическая модель конденсационного процесса в картерном пространстве поршневого двигателя, прогреваемого в условиях отрицательных температур холодного климата / А.В. Колунин, В.Н. Каминский,

А.В. Костюков и др. // Проблемы машиноведения : V Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2021. – С. 226–234.

31. Колунин, А.В. Применение топлив лёгкого фракционного состава в электрофакельном устройстве дизельного двигателя / А.В. Колунин, В.Н. Каминский, И.В. Кузнецов и др. // Проблемы машиноведения : V Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2021. – С. 235–241.

32. Колунин, А.В. Физическая модель процессов, происходящих при функционировании теплового аккумулятора фазового перехода с индукционным нагревателем / А.В. Колунин, Р.С. Курманов, Г.Б. Тодер // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : XVI научная конференция, посвященная Дню российской науки. – Омск, ОмГУПС, 2022. – С. 258–262.

33. Колунин, А.В. Сравнительная оценка теплоэффективности разнофракционных топлив электрофакельного устройства непараметрическим критерием Манна–Уитни / А.В. Колунин, И.В. Матери, М.С. Кoryтов и др. // Проблемы машиноведения : VI Международная научно-техническая конференция. – Омск, ОмГТУ, 2022. – С. 203–212.

#### **Свидетельства и патенты:**

1. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22780. Российская Федерация. Алгоритм определения предельного состояния работающего масла двигателя по щелочному числу / А.В. Колунин, С.В. Белокопытов, А.С. Белокопытов ; заявитель и обладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». – зарегистрировано 23 мая 2017. – 1 с.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660656. Российская Федерация. Расчёт минимального количества топлива, расходуемого в средстве облегчения пуска дизельного двигателя, обеспечивающего воспламенение рабочей смеси / И.В. Матери, С.Ю. Шелпаков, А.В. Колунин, С.А. Касай, Д.Д. Классен, Р.М. Елеманов, А.О. Рогожкин, А.О. Рябов, И.Ф. Покатилов ; заявитель и правообладатель Игорь Вячеславович Матери. – № 2021619257 : заявл. 11.06.2021 : опубл. 29.06.2021. – 1 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662120. Российская Федерация. Расчёт предельных характеристик средств облегчения пуска дизельного двигателя по топливу / И.В. Матери, С.Ю. Шелпаков, А.В. Колунин, С.А. Касай, Д.В. Терзи, Р.М. Елеманов, Н.Ш. Пирмагомедов, А.Д. Ситников, Д.А. Ромашов, С.Н. Шумкин, Д.Д. Классен, А.З. Алибеков ; заявитель и правообладатель Игорь Вячеславович Матери. – № 2021661202 : заявл. 15.07.2021 : опубл. 22.07.2021. – 1 с.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665561. Российская Федерация. Программа для моделирования работы газозлектрофакельного устройства дизельного двигателя ВАТ / И.В. Матери, В.В. Посметьев, А.В. Колунин, Р.М. Елеманов, Т.О. Абышев, А.Д. Ситников,

Р.К. Букеев ; заявитель и правообладатель Игорь Вячеславович Матери – № 2021664723 : заявл. 21.09.2021 : опубл. 28.09.2021. – 1 с.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668421. Российская Федерация. Программа для определения количества тепла, потребного на тепловую подготовку поршневого двигателя тепловым аккумулятором фазового перехода индукционного типа / А.В. Колунин ; заявитель и правообладатель Александр Витальевич Колунин. – № 2022664034 : заявл. 25.06.2022 : опубл. 06.10.2022. – 1 с.

6. Патент № 2763960 С1 Российская Федерация, Газоэлектрофакельное устройство дизельного двигателя : № 2021109668 : заявл. 11.08.2020 : опубл. 11.01.2022 / И.В. Матери, А.В. Колунин, А.С. Шудыкин, Н.Ю. Деревсков, И.А. Бурьян, А.А. Тарасов, Р.С. Курманов, Р.М. Елеманов, А.О. Рогожкин, Д.А. Сизёв, А.О. Рябов, И.Ф. Покатилов ; заявитель и обладатель Игорь Вячеславович Матери, Александр Витальевич Колунин. – 2 с.

7. Патент № 213496 U1 Российская Федерация, Автоматически управляемая приточно-нагреваемая система вентиляции картера : № 2021109668 : заявл. 09.06.2022 : опубл. 14.09.2022 / В.С. Щербаков, А.В. Колунин, И.Е. Кашапова, Ю.А. Колунина ; заявитель и обладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)». — 2 с.

8. Патент № 2782716 Российская Федерация, Способ ультразвуковой очистки поверхностей картерного пространства поршневого двигателя : № 2021109668 : заявл. 06.08.2021 : опубл. 11.01.2022 / А.В. Колунин, И.В. Матери, А.С. Шудыкин, Н.Ю. Деревсков, Д.В. Софьин, А.А. Смолин, М.М. Корнильев, Д.В. Миронов, А.А. Тарасов, Е.С. Лазарев, С.А. Агалаков, В.Б. Николаев ; заявитель и патентообладатель Александр Витальевич Колунин. — 1 с.