

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

**Морозова Ирина Владимировна**

УДК 621.432:662.769.21(043.3)

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ  
ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГЛЕВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО**

Диссертация на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Специальность 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки

Научный руководитель  
Терещенко Юрий Матвеевич,  
доктор технических наук, профессор

Киев–2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
Глава 1. Современное положение проблемы повышения эффективности камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей.....	12
1.1. Рабочий процесс и основные параметры камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей.....	12
1.2. Усовершенствование параметров рабочего процесса и характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей.....	17
1.3. Эмиссионные характеристики камер сгорания газотурбинных двигателей.....	21
1.4. Методы улучшения физико-химических свойств углеводородных топлив.....	33
Выводы по разделу 1.....	42
Глава 2. Теоретические основы электрофизического воздействия на физико-химические свойства углеводородного топлива.....	43
2.1. Магнитные воздействия на характеристики углеводородного топлива.....	43
2.2. Электрофизическое высокочастотное воздействие на углеводородное топливо.....	52
Выводы по разделу 2.....	60
Глава 3. Экспериментальное исследование электрофизического воздействия на физико-химические свойства углеводородного топлива	62
3.1. Методика проведения экспериментального исследования электрофизического воздействия на физико-химические свойства углеводородного топлива.....	62
3.2. Экспериментальные установки для исследования электрофизического воздействия на физико-химические свойства	

углеводородного топлива.....	71
3.2.1. Установка для измерения диэлектрической проницаемости топлива и смазочного масла.....	71
3.2.2. Установка для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ.....	73
3.2.3. Спектральные исследования.....	77
3.2.4. Установки и устройства для оценки эксплуатационных свойств топлива и смазочного масла .....	79
3.3. Влияние постоянного магнитного поля на углеводородное топливо.....	85
3.3.1. Окисляемость углеводородного топлива.....	87
3.3.2. Диэлектрическая проницаемость углеводородного топлива.....	89
3.3.3. Исследование магнитной восприимчивости углеводородного топлива.....	93
3.3.4. Исследование диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь углеводородного топлива.....	96
Выводы по разделу 3.....	103
Глава 4. Исследование эксплуатационных характеристик тепловых двигателей при электрофизическом воздействии на углеводородное топливо.....	105
4.1. Полнота сгорания и нагарообразование низкомолекулярных топлив.....	105
4.2. Влияние электрофизического воздействия на экономические и экологические показатели работы теплового двигателя.....	110
4.3. Влияние магнитного поля на загрязнения и механические примеси.....	117
4.4. Влияние магнитного поля на испаряемость топлива.....	121
4.5. Исследование влияния электрофизического воздействия на	

противоизносные свойства топлива.....	124
4.5.1. Противоизносные свойства авиационного топлива.....	125
4.5.2. Противоизносные свойства дизельного топлива.....	129
4.5.3. Противоизносные свойства смазочного масла.....	133
4.5.4. Износ $\alpha$ - железа при фреттинг-коррозии.....	135
Выводы по разделу 4.....	137
Выводы.....	138
Список использованной литературы.....	140
Приложение.....	154

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ**

ВРД – воздушно-реактивный двигатель

ГТД – газотурбинный двигатель

ИКС – инфракрасная область спектроскопии

КС – камера сгорания

МП – магнитное поле

ОГ – отработавшие газы

ПАВ – поверхностно-активные вещества

СТС – сверхтонкая структура

ТА – топливная аппаратура

ЭФВ – электрофизическое воздействие

ЭПР – электронный парамагнитный резонанс

ЯМР – ядерный магнитный резонанс

**Введение.** Одним из важнейших условий эффективной эксплуатации транспортной техники является применения высококачественного углеводородного топлива с улучшенными эксплуатационными свойствами. По мере развития теории и практики эксплуатации транспортной техники была сформулирована проблема комплексного подхода к решению задач улучшения параметров и характеристик тепловых двигателей. Важное место в решении этих задач занимает согласование параметров и характеристик тепловых двигателей и физико-химических свойств используемых топлив. Разработка и создание эффективных способов улучшения физико-химических свойств углеводородных топлив может обеспечить наибольшую эффективность использования транспортной техники.

Известно, что до 30 % отказов и неполадок тепловых двигателей происходит из-за неудовлетворительных эксплуатационных свойств топлива и что именно топливо, его качество и ресурсы стали определяющими факторами при конструировании новых тепловых двигателей.

**Актуальность темы.** Процесс сгорания топлива в камере сгорания является одним из основных процессов, который определяет эксплуатационные свойства тепловых двигателей. Способность топлива сгорать достаточно полно при любых режимах эксплуатации с выделением наибольшего количества тепла – есть важнейшее эксплуатационное свойство топлива, которое влияет на экономические и экологические показатели. Однако существует и ряд специфических вопросов связанных не только с горением топлива, но и с особенностями трения и износа металлов в топливной среде, стабильностью и склонностью их к образованию отложений нагара в камерах сгорания, коррозионной активностью и другими эксплуатационными свойствами.

Тепловые двигатели, работающие на углеводородном топливе, являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды. В камерах сгорания этих двигателей сжигается огромное количество нефтепродуктов, которые наносят вред окружающей среде.

В настоящее время вопросы улучшения эксплуатационных свойств топлива решаются разными направлениями: деструктивными технологическими процессами переработки нефти, применением присадок и добавок, которые рядом с положительным влиянием имеют ряд недостатков. В связи с этим разрабатываются разные безреагентные методы (ультразвуковая гомогенизация, кавитация, диспергация, обработка магнитным и электромагнитным полями, ультрафиолетовые и  $\gamma$ -излучение, лазерное излучение, и т.д.) улучшение эксплуатационных свойств топлива, а также методы электрофизического воздействия, что позволяет повысить "энергозапас" топлива. Однако механизм электрофизического воздействия на углеводородное топливо сложный и мало изучен как теоретически, так и практически.

В связи с этим задачи изучения процессов, протекающих в углеводородных топливах после электрофизического воздействия являются чрезвычайно актуальными. Проведение исследований в данном направлении разрешит проявить сущность электрофизического воздействия и найти пути наиболее эффективного и экономического его использования для повышения эксплуатационных показателей тепловых двигателей и энергетических установок.

#### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа выполнена согласно «Стратегии развития отечественной авиационной промышленности» на период до 2020 года, которая одобрена распоряжением Кабинета Министров Украины от 27 декабря 2008 г., № 1656-р.

Работа выполнялась в рамках исследований государственной научно-исследовательской темы «Исследование влияния электромагнитных полей на углеводородные жидкости и разработка устройства для магнитной обработки топлив и смазывающих масел», № 673-Г11.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования являются повышения эффективности тепловых двигателей и энергетических установок на основе

применения электромагнитного воздействия на топливо, которое поступает в двигатель.

Для достижения этой цели определены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ методов и способов усовершенствования параметров и характеристик камер сгорания тепловых двигателей.

2. Выполнить теоретико-экспериментальные исследования электрофизического воздействия на электрофизические параметры углеводородного топлива.

3. Разработать методику электрофизического воздействия на углеводородное топливо с использованием результатов теоретико-экспериментальных исследований для оценки процессов в камерах сгорания тепловых двигателей.

4. Провести оценку эффективности электрофизического воздействия на углеводородное топливо и характеристики тепловых двигателей.

**Объект исследования:** рабочий процесс в камерах сгорания тепловых двигателей.

**Предмет исследования:** электрофизическое воздействие на физико-химические параметры углеводородных топлив в камерах сгорания тепловых двигателей.

**Методы исследования.** Теоретические аспекты диссертации базируются на фундаментальных положениях физико-химического анализа процессов горения углеводородного топлива. Экспериментальные исследования выполнены с применением спектрального, фотоэлектрического, хроматографического методов и стандартных методов определения физических параметров углеводородного топлива. Достоверность полученных результатов обеспечивалась корректным применением моделей и методов расчета электрофизического воздействия на углеводородное топливо и подтверждалась удовлетворительным согласованием результатов теоретических расчетов с



данными экспериментальных исследований, выполненных апробированными методиками.

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые создана методика электрофизического воздействия на топливо с целью улучшения его физико-химических и экологических свойств. Установлено, что электрофизическое воздействие повышает полноту сгорания топлива и снижает отложение нагара в камере сгорания на 20...25 %.

2. Впервые полученные результаты исследований электрофизического воздействия на физико-химические свойства топлива. Доказано, что электромагнитное поле действует на протонную систему углеводородной жидкости и оказывает содействие повышению энергозапаса молекулярной системы. Установлено, что существует оптимальное значение величины переменного электромагнитного поля, при котором наблюдается максимум амплитуды сигнала абсорбции и максимальное влияние на электрофизические параметры топлива.

3. Установлено, что электрофизическое воздействие на топливо, путем применения ядерного резонанса в неоднородном магнитном поле, приводит к повышению скорости реакции окисления в основной фазе горения, вследствие чего происходит снижение удельного и часового расхода топлива (2...4 %), повышение крутящего момента и нагрузки двигателя (1–2 %) и снижение токсичности отработанных газов теплового двигателя ( $C_mH_n$  на 25...35 % и  $NO_x$  на 12...16 %).

**Практическая ценность полученных результатов.** На основании предложенного способа разработано устройство электрофизического воздействия на топливо в неоднородных постоянных магнитных полях. Устройство позволяет улучшить эксплуатационные свойства топлива и таким образом повысить эксплуатационные показатели (снизить расход топлива, уменьшить количество токсичных составляющих в отработанных газах) разных

тепловых двигателей и одновременно обеспечить повышенную тонкость очищения топлив от смолистых, сернистых, ферромагнитных соединений.

**Личный вклад соискателя.** Все положения диссертационной работы соискателем разработаны и выполнены самостоятельно. Лично автору принадлежит создание нового способа и разработка устройства электрофизического воздействия на эксплуатационные свойства топлива в неоднородных магнитных полях.

В научных статьях, которые были напечатаны в соавторстве, автору диссертационной работы принадлежит:

– в работах [62, 69] разработка способа и устройства электрофизического воздействия на углеводородные жидкости для улучшения параметров камер сгорания тепловых двигателей;

– в работе [63] исследование возможности повышения эффективности контроля качества топлива для тепловых двигателей, путем измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь углеводородных жидкостей при пониженной частоте и малому напряжению на емкостном измерительном преобразователе;

– в работе [64] обоснование методики электрофизического воздействия для контроля качества углеводных жидкостей;

– в работе [65] анализ динамики электрофизического воздействия на углеводородные жидкости;

– в работе [66] разработка методики электрофизического воздействия на топливо с целью улучшения эксплуатационных показателей тепловых двигателей;

– в работе [67] исследование способа электрофизического воздействия на противоизносные свойства горюче-смазочных материалов для увеличения надежности и ресурса работы тепловых двигателей;

– в работе [68] исследование эксплуатационных показателей тепловых двигателей методом электрофизического воздействия.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований диссертационной работы докладывались и обговаривались на следующих международных конференциях: Международная научно-техническая конференция "АВИА-2003", "АВИА-2006", "АВИА-2009", "АВИА-2011", "АВИА-2013" (г. Киев, 2003-2013 гг.); II международная научно-техническая конференция "Проблемы химмотологии" (г. Киев, 2008 г.); VIII Международная научно-практическая конференция "Ключевые аспекты научной деятельности" (Польша, 2012 г.); XVI Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов "Полет. Современные проблемы науки" (г. Киев, 2016 г.); XXVI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения» (г. Москва, 2016 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы: в 8 научных работах, из них 6 – в научных периодических профессиональных изданиях ГАК МОН Украины, 2 – в наукометрических базах данных; в 8 докладах на научно-технических конференциях и в 2 патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, общих выводов и списка использованных источников из 142 названий. Общий объем работы представляет 159 страниц, 28 рисунков, 8 таблиц.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1. Рабочий процесс и основные параметры камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей

Камеры сгорания тепловых двигателей связаны с процессом горения жидких углеводородных топлив в турбулентном потоке подвижного воздуха. Если топливо и окислитель подводят к зоне реакции с разных сторон, то время горения определяется временами смешивания – диффузией. Диффузный механизм горения характерен для капель жидкого и твердого топлива, который наблюдается при горении свечи, керосиновой лампы.

Другим предельно типичным случаем является кинетическое горение гомогенной (однородной, перемешанной) смеси топлива с окислителем. При этом подготовленная смесь поднимается к зоне реакции, а время горения будет, преимущественно, определяться временем, необходимым для протекания химической реакции. Подобный процесс называется кинетическим, так как при нем время горения определяется механизмом и скоростью химической реакции.

Типичные предельные случаи горения в диффузном и кинетическом участках при определенном изменении условий могут постепенно переходить один в другой, образуя промежуточные случаи, в которых общее время горения будет определяться наиболее продолжительным процессом. Выгорание гомогенной смеси в турбулентном факеле может наблюдаться и в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей (ВРД). В некоторых камерах сгорания ВРД наблюдаются случаи диффузного горения.

В камере сгорания ВРД процессы приготовления, сгорание смеси и перемешивание продуктов сгорания с воздухом протекают в турбулентном потоке и сильно зависят от характеристик турбулентности.

С уменьшением давления турбулентность в фиксированной точке потока уменьшается. Это имеет важное значение для камер сгорания ВРД, которые работают и при низких давлениях, и объясняется тем, что с уменьшением давления увеличивается коэффициент кинематической вязкости газа  $\nu$ , при прочих равных условиях уменьшается число  $Re$ . Коэффициент динамической вязкости газа  $\eta$  не зависит от давления, а коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  возрастает с уменьшением давления.

Топливо в камере сгорания ГТД подается форсунками в распыленном виде. При неблагоприятных условиях (относительно низкой температуры воздуха, малых давлений распыливания) часть капли может не успеть испариться до факела пламени. В этом случае в зону горения будет поступать гетерогенная смесь, которая состоит из воздуха, паров топлива и капли жидкого топлива. Исследования горения двухфазных газоздушных смесей показало, что подобные смеси горят в более широком диапазоне изменения  $\alpha$ , чем гомогенные смеси. При испарении капель создаются местные концентрации смеси, более благоприятные для горения, чем в гомогенной смеси при том же самом среднем значении  $\alpha$ . Скорость распространения зоны горения в двухфазных смесях такого же порядка, что и для однородных смесей.

В камерах сгорания ГТД средняя скорость потока также всегда больше, чем скорость турбулентного сгорания, поэтому остается актуальной задача стабилизации факела пламени. Эта задача решается разными конструктивными приемами, но все они приводят к созданию фронтального устройства определенной газодинамической структуры потока с зоной обратных струй.

Камера сгорания является наиболее важной частью газотурбинных двигателей. Она должна обеспечивать необходимое подведение тепла к рабочему телу и быть разработана таким образом, чтобы процесс горения поддерживался самостоятельно, а на входе в турбину поле температур продуктов сгорания было по возможности максимально равномерным с температурой ниже максимальной температуры в ядре пламени. Разработке теории процессов горения углеводных

топлив в камерах сгорания тепловых двигателей посвящены работы Я. Б. Зельдовича [38, 39], Г. Г. Чёрного [124], Ю. М. Пчелкина [94], Б. В. Канторовича [45], Д. Б. Сполдинга [100], Ф. А. Вильямса [18], В. А. Лиханова [55], С. С. Наметкина [107], В. О. Христича [120] и других учёных.

В традиционных камерах сгорания, процесс горения организован в двух зонах – первичной и вторичной. В первичной зоне происходит образование топливно-воздушной смеси и сгорание основного количества топлива, во вторичной зоне догорает остаточное топливо, а продукты сгорания охлаждаются до установленной температуры на входе в турбину. От организации процесса горения в первичной и вторичной зонах полностью зависят эксплуатационные и экологические характеристики камер сгорания.

Эксплуатационные характеристики оцениваются такими параметрами, как коэффициент полноты сгорания топлива  $\eta_c$ , коэффициент сохранения полного давления воздуха  $\sigma_{kc}$  теплонапряженность камеры  $Q_v$ .

Экологические характеристики оцениваются индексами эмиссии вредных газообразных веществ (кроме сажи), которые представляют собой отношение массы вещества в граммах к 1 кг израсходованного топлива. Соответственно, различают  $EI_{CO}$ ,  $EI_{CnHm}$ ,  $EI_{NOx}$ .

В связи с возрастающими требованиями к авиационным двигателям и стационарным ГТУ – увеличение полноты сгорания топлива, снижение вредных выбросов, возможности использования альтернативных топлив (тяжелых фракций, синтетического газа, водорода, с подачей воды или пара в камеру сгорания) – вопросу подготовки и подачи топлива отводится все большее внимание.

Сложный ход процессов горения значительно усложняет проектирование камер сгорания, который связан с обеспечением противоречивых требований. С одной стороны камеры сгорания должны иметь: высокую полноту сгорания топлива ( $\eta_c \geq 0,99$ ); надежный запуск на земле и в заданных условиях полета на высоте; стойкость горения в широком

диапазоне коэффициентов избытка воздуха (от  $\alpha_{min}=1,0...1,5$  до  $\alpha_{max}=20...40$ ), давления и скорости; малые потери полного давления ( $\sigma_{кв}=0,97...0,99$ ); обеспечение заданных окружных и радиальных эпюр температуры газа на входе в турбину. С другой стороны необходимо обеспечить: низкий уровень выбросов вредных веществ ( $CO$ ,  $C_nH_m$ ,  $NO_x$ , дыма), отложений нагара в жаровой трубе; низкую себестоимость изготовления и простоту обслуживания в эксплуатации; высокую надежность и ресурс; обеспечение трудоспособности камеры сгорания без ремонта определенного гарантированного срока; малую массу и габаритные размеры.

Для выполнения таких жестких требований необходимо глубокое понимание физико-химических процессов в камере сгорания, главной отличительной особенностью которых, по сравнению с другими узлами ГТД, является отсутствие постоянных надежных методов проектирования и использование для этого эмпирических подходов.

Большинство камер сгорания, которые эксплуатируются, разработаны на основе диффузного горения. В диффузных камерах всегда есть область со стехиометрической топливной смесью, несмотря на общую нестехиометрию. Основным недостатком диффузных камер сгорания есть эмиссия оксидов азота  $NO_x$ , которая связана с высокой температурой в первичной зоне горения. При этом, образовывается больше чем 70 ppm  $NO_x$  при сгорании газообразного топлива, и больше 100 ppm при сгорании жидкого топлива [105]. Для снижения выбросов  $NO_x$  применяются разные подходы, которые в итоге сводятся к тому, что снижение эмиссии  $NO_x$  приводит к снижению эффективности сгорания, которое в свою очередь влияет на уровень выбросов  $CO$  и несгоревших углеводородов, таким образом, при проектировании камер сгорания необходимо находить баланс между эффективностью и эмиссией вредных веществ камер сгорания.

В двигателях, предназначенных для работы на жидком и газообразном топливах, необходимо обеспечивать одинаковые поля температур на выходе из

камеры сгорания за счет распределения потоков топлива и воздуха. При использовании газообразного топлива изымаются стадии распыления и испарения. Но в связи со значительным увеличением его объема из-за малой плотности необходимы значительные проходные сечения форсунок. Для подачи газа в камеру используют специальные форсунки, вместо центробежных, в виде отверстий, щелей, завихрителей, трубок Вентуры и т.д. В реальных конструкциях хорошо себя зарекомендовали чашевидные горелочные устройства с многосопловой газовой форсункой и подачей воздуха перпендикулярно к газовой струе. При теплотворной способности газообразных топлив не меньше  $6 \text{ МДж/м}^3$  их сжигание не создает трудностей, за исключением необходимости оптимального перемешивания в зоне горения. Горение газа обычно происходит с меньшим образованием дыма и  $\text{NO}_x$  из-за снижения образования сажи и более короткого факела горения. Метан является основным компонентом природного газа (85...98 %), имеет температуру горения на  $100...150^\circ\text{C}$  ниже, чем жидкие топлива. Он сгорает без образования сажи с малым уровнем горения пламени, которое снижает температуру стенок жаровой трубы. Сравнительно высокая температура загорания, низкая скорость горения и узкие концентрационные границы распространения пламени смеси метана с воздухом усложняют запуск и могут привести к нестабильности горения и снижению  $\eta_e$ , особенно на режимах частичных нагрузок, вследствие чего увеличиваются выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$ . Поэтому большое внимание следует уделять процессам смесеобразования и стабилизации пламени. Для этого в камере сгорания часто устанавливают кроме основных, дополнительные горелки диффузного типа, которые поддерживают высокую температуру в зоне горения на всех режимах.

Высокая полнота сгорания обеспечивается в основном при смесях, близких к стехиометрическим ( $\alpha_e=1,2...1,3$ ), и гомогенным смесям.

Применение топлива меньшей калорийности может создать проблему в вопросе согласования турбокомпрессора из-за снижения температуры газа перед турбиной и увеличения относительного расхода топлива.



Малая скорость реакции окисления низкокалорийных газообразных топлив нуждается в дополнительном увеличении объема зоны горения. А трудности обеспечения оптимальных скоростей смешивания в зоне горения приводят или к срыву пламени при «бедных» смесях через очень большие скорости смешивания, или к «жесткому» горению при низкой скорости смешивания.

## **1.2. Усовершенствование параметров рабочего процесса и характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей**

В настоящее время усовершенствования параметров рабочего процесса камер сгорания основывается на оптимизации их термодинамических и эмиссионных параметров при разных режимах работы ГТД. Для этого разрабатываются новые конструкции камер сгорания, которые развиваются по двум основным направлениям: организация процесса горения (стабилизация горения, обеспечение необходимой температуры и равномерности поля температур на входе в турбину); подготовка топливовоздушной смеси (распыление, испарение топлива, смешивание топлива с воздухом).

Среди новых конструктивных схем камер сгорания, сегодня используют камеры сгорания, выполненные по двухзонной схеме [108]. Зоны горения могут располагаться последовательно или параллельно в два яруса. Работа обеих зон горения оптимизируется величиной коэффициента полноты сгорания, который уменьшает выбросы  $CO$  и  $C_nH_m$  как на низких, так и на повышенных режимах работы ГТД. Основная зона обеспечивает горение бедной смеси в максимальном режиме, который уменьшает выбросы  $NO_x$ . На промежуточных режимах могут использоваться разные комбинации режимов обеих зон. Согласно данным фирмы PW двухярусная камера позволяет снизить выбросы  $CO$  и  $C_nH_m$  по сравнению с обычной, соответственно на 69 и 93 % , а эмиссию  $NO_x$  – на 41 %.

В камере с последовательным расположением зон горения первая ступень работает на режиме малого газа, вторая работает на максимальном и

промежуточном режимах. На режиме малого газа топливо подается только в зону малого газа. На повышенных режимах начинается подача топлива в основную зону через форсунки, которые расположены в выходном сечении зоны малого газа.

Воздух в основную зону поступает через завихрители, которые расположены на внешней и внутренней стенках жаровой трубы. Применение специальных завихрителей ускоряет перемешивание топлива с воздухом, которые обеспечивают более быстрое сгорание бедной смеси в основной зоне и, соответственно, уменьшают время пребывания горючей смеси в камере сгорания. Такое выполнение камеры приводит к выравниванию температуры вдоль камеры и устранение зон с наиболее высокой температурой, которая существенно уменьшает выбросы  $NO_x$  (до 40%) [60].

Анализ исследований NASA показал, что использование двухзонной камеры в двигателе JT9-7A, по сравнению с обычной, на режиме малого газа позволяет уменьшить эмиссию  $CO$  и  $C_nH_m$  на 90 % при практически неизменной эмиссии  $NO_x$ .

Результаты испытаний двухзонных камер позволили выявить такие их недостатки как увеличение дымности, осложнение при запуске, ухудшение приемистости. В камерах с последовательным расположением зон, также, наблюдалось окисление  $CO$  при больших затратах воздуха из-за завихрителей основной зоны, которые расположены за узким сечением зоны малого газа, вследствие преждевременного охлаждения газов. Для устранения указанных недостатков на сегодняшний день продолжают работы по усовершенствованию камер сгорания.

Для уменьшения выбросов вредных веществ на пониженных режимах разрабатываются камеры сгорания с регулируемой площадью проходных сечений в фронтальном устройстве. Например, в двигателе CF6-70 регулирование первичного расхода воздуха осуществляется путем изменения площади проходных сечений завихрителей, расположенных в фронтальном

устройстве. С этой целью внешний лопаточный завихритель на входе в первичную зону выполнен вращающимся. К недостаткам регулируемых камер относят их конструктивную сложность и недостаточную надежность.

Не менее важным направлением повышения эффективности камер сгорания, является усовершенствования способов подготовки топливо-воздушной смеси и интенсификации процессов горения.

Практически все способы интенсификации горения, направлены на устранение гетерогенного горения капель и объединяют в себе принципы предыдущего перемешивания и испарения. В испарительных камерах сгорания испарение топлива осуществляется в трубчатых элементах, которые находятся в зоне горения и продуваются частью первичного воздуха. Этим обеспечивается предыдущее смешивание паров топлива с воздухом и первичное окисление углеводородов. Тем не менее, полное предварительное испарение топлива затруднено из-за его термического разложения, нагарообразования и коксования элементов.

Подведение воды или пара в зону горения вместе с горючим или воздухом позволяет снизить  $NO_x$ , уменьшить дымность, а в ряде случаев и повысить полноту сгорания жидких топлив. Для тяжелых топлив особенно эффективно применение водотопливных эмульсий, однако в некоторых случаях введения дополнительного количества воды может привести к химическому несгоранию. Значительными недостатками являются также проблемы, связанные с получением, подачей и сохранением больших количеств дистиллированной воды, а также с обеспечением необходимого уровня надежности работы арматур и агрегатов топливной системы.

Повышение интенсивности горения в камерах сгорания ГТД можно добиться применением разных катализаторов [122]. Перспективными являются катализаторы в виде твердых тел с развитой площадью активной поверхности, изготовленные из пластины хрома, оксидов кобальта, лантана, цезия и др. Однако, пока ещё нерешены проблемы сохранения их продолжительной

активности в агрессивных средах и защите от вибрационных и температурных нагрузок.

Введением специальных органометаллических присадок в топливо удается снизить содержание частичек углерода в продуктах сгорания приблизительно на 50 %, а эмиссию  $NO_x$  – на 30 %. Однако, оксиды металлов, которые содержатся в присадках, могут образовывать в проточной части двигателя отложения, которые приводят к местным перегревам и коррозии.

Добавки водорода, водородосодержащих газов и кислорода к горючей смеси увеличивают возможности инициирования горения углеводородов. При добавках водорода в количестве 5 % от суммарной затраты топлива удается в 2...3 раза снизить эмиссию  $CO$  и углеводородов на режимах малой мощности. Применение водорода снижает содержание  $NO_x$  в результате организации сжигания обедненных смесей, а также подавляет возможные режимы вибрационного горения. Использование кислорода также интенсифицирует процессы сжигания. Например, обогащение используемого для горения воздуха кислородом до 30 % сокращает длину видимой зоны факела на 4...6 %. При этом повышается коэффициент полноты сгорания топлива, а окислительные свойства продуктов сгорания практически не изменяются. Основным препятствием широкого применения подобных добавок есть относительно высокая стоимость их получения и сложность хранения.

Среди современных методов повышения эффективности камер сгорания отдельно можно выделить методы электромагнитного воздействия на углеводные топлива. Электромагнитная обработка происходит на этапе подготовки топлива к сгоранию.

К работам, которые описывают изменения физико-химических характеристик углеводного топлива под влиянием электрических и магнитных полей в камерах сгорания тепловых двигателей, следует отнести исследования, выполненные: А. Э. Малиновским [58], Л. Г. Гинзбургом [23], О. В. Белым [11], А. П. Андриевским [8], В. Г. Мурамовичем [78],

В. А. Звоновым [37], Е. М. Захватовым [36], А. А. Хохолиным [119], Д. С. Погорлецким [89], Д. Лаутоном [17], Ф. Вайнбергом [17] и др.

### **1.3. Эмиссионные характеристики камер сгорания газотурбинных двигателей**

Особое внимание во время создания двигателей уделяют образованию вредных веществ в камерах сгорания (КС), исходя из экологических норм. Результаты исследований аварийных ситуаций при эксплуатации авиационных двигателей свидетельствуют о причинах их возникновения вследствие колебательных процессов в КС, связанных с ее акустическими свойствами.

Основными выбросами, которые загрязняют атмосферу, в отработанных газах авиационных двигателей являются оксид углерода ( $CO$ ), несгоревшие углеводороды ( $C_nH_m$ ), оксиды азота ( $NO_x$ ) и дым с твердыми частичками сажи, которая снижает прозрачность атмосферы и содержит канцерогенные вещества, включая бензапирен  $C_{20}H_{12}$ . В случае наличия в топливе серы образуются токсичные окиси серы ( $SO_x$ ) в виде оксидов  $SO_2$  и  $SO_3$ , которые вызывают коррозию конструкционных материалов и могут приводить к образованию капель серной кислоты. В стратосфере соединения серы оказывают содействие образованию твердых частичек, которые не пропускают солнечный лучи, а оксиды азота разрушают озоновый слой, который приводит к увеличению ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли. Кроме того, продукты полного сгорания топлива, водный пар и двуокись углерода могут создавать опасность возникновения «парникового эффекта».

Выбросы оксидов серы могут быть снижены способом очищения топлива в процессе рафинирования, в то время как уменьшение выбросов  $NO_x$ , образующихся при горении топлива вследствие окисления азота, который содержится в воздухе, а также уменьшение продуктов не догорания топлива:  $CO$  и  $C_nH_m$ , являются проблемой двигателестроения. Поскольку вредные выбросы авиационных двигателей могут привести к значительному локальному загрязнению воздуха в зоне аэропортов, которая представляет опасность для человека - введены

ограничения на выбросы  $CO$ ,  $C_nH_m$ ,  $NO_x$  и дыма из газотурбинных двигателей на эксплуатационных режимах, в виде допустимых норм для некоторого стандартного цикла взлетно-посадочных режимов. Этот цикл включает все режимы работы двигателя от момента достижения самолетом отметки высоты 914 м (3000 фут) при посадке и к моменту достижения этой же отметки при наборе высоты после взлета, т.е. снижение высоты 914 м, пробег после посадки, руление и разгонка при взлете, набор высоты.

Продолжительность режимов стандартного цикла приведен в табл. 1.1. Уровень выбросов измеряется в граммах вещества за цикл на 1 кН взлетной тяги и определяется по формуле:

$$\frac{M_j}{R_{3л}} = \sum_{i=1}^4 (EJ_j)_i \frac{G_{пi} \tau_i}{R_{3л}} = \frac{1000}{3600} \sum_{i=1}^4 (EJ_j)_i C_R \bar{R}_i \tau_i, \quad (1.1)$$

где  $M_j$  – масса вещества  $j$ , что выделяется за стандартный цикл, который состоит из  $i$  режимов, г;  $R_{взт}$  – взлетная тяга, кН;  $EJ$  – удельный выброс, г/(кг топлива);  $G_{тi}$  – расход топлива, кг/с; ( $\tau_i$  – продолжительность  $i$ -го режима, с;  $C_R$  – удельный расход топлива, кг/(Н·ч);  $\bar{R}_i = R_i / R_{взт}$  – относительная тяга.

Таблица 1

Типичный взлетно-посадочный цикл

Режим	Тяга $R$ , %	Время, мин
Взлет	100	0,7
Набор высоты	85	22
Заход на посадку	3	4
Руление	7	26

Как видно из формулы (1.1), уровень норм выбросов зависит от совершенства камеры сгорания, которое характеризуется удельными выбросами  $(EJ_j)_i$ , и от значений удельного расхода топлива  $c_{уд}$  при каждом режиме работы взлетно-посадочного цикла.

Поскольку удельный выброс  $EJ_j$  равняется количеству, выделяемого при сгорании 1 кг топлива, вещества  $j$ , то выбросы  $CO$  и  $C_nH_m$  определяются значением коэффициента полноты сгорания топлива. Связь между уровнями выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$  и значением коэффициента полноты сгорания топлива согласно статистическим данным аппроксимируется зависимостью (1.1), где  $CO$  и  $C_nH_m$  – удельные выбросы веществ, в г/(кг топлива). Согласно выражению (1.1) для удовлетворения требований допустимых выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$ , значение коэффициента полноты сгорания должны быть больше, чем 0,99 на всех режимах работы двигателя, включая малый газ.

Уровни выбросов каждого из веществ зависят от распределения температуры, концентраций топлива и времени пребывания в камере сгорания. Причем перечисленные факторы могут иметь прямо противоположное влияние на выбросы разных веществ, что является главной проблемой в разработке камер сгорания с малыми выбросами. Кроме того, в связи с изменением этих факторов при изменении режима работы двигателя по-разному изменяются и выбросы разных веществ.

Это свидетельствует о необходимости поиска компромиссных решений для преодоления этой проблемы. Для решения такой проблемы должно быть глубокое понимание механизмов образования вредных веществ.

Образование  $CO$  происходит в первичной зоне при богатых смесях из-за нехватки кислорода для полного окисления углерода к  $CO_2$ , а при стехиометричных и умеренно бедных смесях  $CO$  образовывается вследствие диссоциации  $CO_2$ . Низкие уровни образования  $CO$  могут быть достигнуты за счет обеспечения в зоне горения  $\alpha_2=1,1...1,4$ . Тем не менее при этом надо помнить, что выброс  $CO$  возрастает относительно термодинамического равновесия, особенно на режиме малого газа по нескольким причинам: через неоднородность смеси, низкую скорость горения в первичной зоне, недостаточное время пребывания смеси в зоне горения для окисления  $CO$ , а

также вследствие «замораживания» продуктов неполного сгорания, которые выносятся охлаждающим воздухом в пристеночный слой жаровой трубы.

При неоднородности смеси в локальных участках с богатой смесью концентрация  $CO$  увеличивается из-за недостатка кислорода, а в зонах с очень бедной смесью – из-за медленного горения. К несгоревшим углеводородам  $C_nH_m$  относятся парообразные и жидкие частички топлива, продукты его разложения меньшей молекулярной массы. Основными причинами их выброса такие же, что и при образовании  $CO$ : недостаточное распыливание и смесеобразование, малая скорость горения и «замораживание» в пристеночном слое охлаждающего воздуха. Поэтому для уменьшения выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$  используют одни и те же средства:

- улучшение распыления топлива для ускорения испарения и создание гомогенной смеси;

- оптимальное распределение воздуха в камере сгорания для обеспечения в первичной зоне  $\alpha_{нз}=1,4$  на всех режимах работы путем рационального регулирования (использование многорежимных форсунок или частичного их отключения, специальной подготовки топливо-воздушной смеси и др.);

- увеличение объема первичной зоны и времени пребывания в ней топлива;

- догорание  $CO$ ,  $C_nH_m$  и уменьшение сажи в промежуточной зоне;

- уменьшение затрат воздуха на пленочное охлаждение жаровой трубы на участке первичной зоны за счет использования теплозащитных покрытий или специальных конструкций жаровых труб (сегментной с конвективно-пленочным охлаждением, двухъярусных, двухзонных, секционных, с параллельно-противотекущим движением воздуха конвективно-пленочного охлаждения и т.п.).

Увеличение выброса несгоревших углеводородов и  $CO$  с изменением режима работы двигателя в сторону малого газа (при дросселировании) объясняется не только ухудшением распыления топлива, но преимущественно уменьшением



скорости химических реакций в первичной зоне из-за снижения давления и температуры воздуха на входе в камеру сгорания.

Оксиды азота  $NO_x$  образуются в виде  $NO$  и  $NO_2$  в результате экзотермической реакции окисления азота воздуха, а также окисления азота, который содержится в топливе при сравнительно высокой температуре ( $T^* > 1800$  К).

Главным методом, которое уменьшает выбросы  $NO_x$ , является снижения температуры пламени в зоне горения обеднённой заранее подготовленной смесью, поскольку выбросы  $NO_x$  экспоненциально возрастают с повышением температуры пламени согласно соотношению  $NO_{x,EL} \sim \exp 0,009T$ , где  $T$  – температура в зоне горения, К. Причем необходимо также выделить локальные участки высокой температуры. Тем не менее улучшение смесеобразования (гомогенизация горения) только при «обеднённой» первичной зоне оказывает содействие снижению выбросов  $NO_x$ . Для стехиометричной смеси выброс  $NO_x$  возрастает при ее равномерном составе и, наоборот, снижается при неравномерности состава. Учитывая то, что для уменьшения  $NO_x$  необходимо снижать температуру пламени добавлением воздуха в первичную зону (использовать «бедную» первичную зону), гомогенизация горения целесообразна, хотя снижение температуры пламени в первичной зоне для снижения выбросов  $NO_x$  возможно только в ограниченных границах, поскольку при этом возрастают выбросы  $CO$  и  $C_nH_m$ . Взаимное влияние коэффициента избытка воздуха в зоне горения и степени неравномерности состава выброса  $NO_x$  следует учитывать при конструировании камер сгорания, особенно при  $1,2 > \alpha_{зг} > 1,35$ . При  $\alpha_{зг} \approx 1,25$  влияние степени неравномерности смеси на выброс  $NO_x$  практически отсутствует.

Кроме снижения температуры в зоне реакции на уменьшение  $NO_x$  влияет также сокращение времени пребывания газа при высокой температуре. Снижение температуры пламени и времени пребывания легко достигается увеличением затраты воздуха через первичную зону, но это приводит к увеличению выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$ , поэтому много методов снижения вредных

выбросов сводятся к поиску компромисса между выбросами  $CO$  и  $C_nH_m$ , с одной стороны, и выбросом  $NO_x$ , с другой стороны. Тем не менее такое решение означает лишь перемещение вдоль характеристики  $CO-NO_x$  за счет изменения режима работы двигателя и не свидетельствует о важном прогрессе в уменьшении выбросов. Конструктивные усовершенствования без изменения основной конструкции камеры сгорания (использование совершенных способов подачи топлива, оптимальное распределение  $\alpha$ , изменение конструкции жаровой трубы и усовершенствование ее охлаждения и др.) – один из подходов снижения выбросов. Для уменьшения  $NO_x$  рекомендуется поддерживать в первичной зоне  $\alpha_{пз} \sim 1,4$  при изменении режимов работы с улучшением смесеобразования, а также использовать зонное горение для уменьшения пребывания в зоне высокой температуры.

Снижение выбросов  $NO_x$  может быть обеспечено впрыскиванием воды в первичную зону или циркуляцией продуктов сгорания (подведением в первичную зону охлажденных продуктов сгорания как инертных растворителей). Впрыскивание воды в зону горения до 100 % по массе топлива приблизительно в 5 раз снижает выбросы  $NO_x$ , причем уменьшение выброса происходит преимущественно за счет воздушного термического окисления азота  $NO$ , который уменьшается более чем в 10 раз, а быстрый  $NO$  при этом снижается всего в 1,5 раза. Добавление воды к воздуху на входе в камеру сгорания вместо впрыскивания непосредственно в зону горения менее эффективное (эффект снижается в  $\sim 1,5$  раза).

Для азотосодержащих топлив эффект впрыскивания воды ослабляется из-за некоторого роста топливного  $NO$ . В случае содержания в топливе 1 % азота общее снижение выброса  $NO_x$  за счет впрыскивания воды в зону горения в количестве 100 % по массе топлива происходит всего в 2 раза. Несмотря на снижение выбросов  $NO_x$ , впрыскивание воды или подачи пара успешно применяется в больших газовых турбинах тепловых электростанций и промышленных ГТУ, где нет проблемы с водоснабжением.

Добавление водорода или пропана в топливно-воздушную смесь смещает границу «бедного» срыва пламени в сторону больших значений  $\alpha$ , сокращая выбросы  $NO_x$  без ухудшения полноты сгорания топлива.

Дымность выхлопных газов связана с образованием мелких частичек сажи, в состав которой входит 96 % углерода и 4 % смеси его соединений с водородом и кислородом. Дымление с образованием сажи происходит в богатых топливом участках, где  $\alpha < 0,8$ , например, в центре зоны обратных струй. Большая часть сажи, образованной в первичной зоне, сгорает в высокотемпературных участках, т.е. дымление камеры сгорания можно рассматривать как двухстадийный процесс: образование сажи в первичной зоне и ее выгорание в промежуточной и зоне разбавления. В зависимости от того, которая из стадий доминирует, получаем разную концентрацию сажи на выходе из камеры сгорания. Образование сажи зависит от способа подачи топлива и качества его распыливания, давления и температуры в камере сгорания, распределения  $\alpha$ , свойства топлива. При уменьшении водорода в топливе возрастает склонность к дымлению.

Со снижением давления в камере сгорания образование сажи уменьшается, а при давлении ниже чем 0,6 МПа в однородной газовой смеси сажа вообще не образовывается при любых значениях  $\alpha$  (т.е. даже в богатых смесях). Повышение давления  $p^*_k > 0,6^0$  МПа и уменьшение  $\alpha < 0,8$  приводят к росту образования сажи.

Увеличение температуры воздуха на входе в камеру сгорания приводит к усилению дымления, особенно в богатых смесях ( $\alpha < 0,6$ ), а повышение температуры газа на выходе из камеры, наоборот, ослабляет дымление через расширение участка выгорания сажи непосредственно в зоне смешивания, где есть избышек воздуха для ее сжигания. Использование пневмофорсунок дает возможность существенным образом уменьшить сажеобразование. Кроме улучшения подготовки топливно-воздушной смеси и увеличение  $\alpha$  в зоне горения, для снижения дымления, как и для уменьшения выбросов  $NO_x$ , может

быть рекомендовано впрыскивание воды в зону горения или добавление присадок в топливо. Тем не менее применение последних может привести к выбросу в атмосферу новых токсичных веществ или к нагарообразованию на лопатках турбины.

Реализация методов снижения вредных выбросов в окружающую среду привела к созданию камер сгорания новых схем: двухзонных, двухъярусных, изменяемой геометрии, каталитических и т.д. Особенностью большинства из них есть стремления удовлетворить требования изменения температуры в зоне горения в очень узком интервале на всех эксплуатационных режимах работы двигателя. Такое требование вытекает из условия допустимых концентраций  $CO$  и  $NO_x$  [102].

Допустимый интервал изменения температуры  $\Delta T_{\text{доп}}$ , в котором уровни выброса  $CO$  и  $NO_x$  ниже предельных, находится между 1600 и 1730 К. Одним из способов удовлетворения данного требования есть организация процесса горения в ряде дискретных зон (зонное горение). Практически зонное подведение тепла реализовано в виде радиального (двухъярусная камера сгорания) и осевого (двухступенчатая камера сгорания типа «Ворбикс») расположения зон.

Причем для эффективного уменьшения выбросов в камерах сгорания с зонным подведением тепла должны быть обеспечено зонное подведение, как топлива, так и воздуха.

Отличительные признаки эшелонированного в осевом направлении горения заключаются в следующем. Первичная зона горения с системой подачи топлива, которое обеспечивает необходимое подведение тепла на режимах малого газа, создает очередное пламя для зажигания топлива в дальних зонах горения. Дальние зоны горения (одна или несколько) ниже в потоке обеспечивают выделение дополнительного тепла на других режимах работы за счет отдельного подведения топлива и воздуха. Причем на каждом этапе горения подведения топлива и воздуха должны обеспечивать их качественное

смесеобразование. В конце каждой зоны подводится часть смешенного воздуха для снижения температуры на величину интервала ее изменения. Итак, происходит пилообразное изменение температуры по мере подачи топлива вдоль камеры сгорания.

В отличие от камеры сгорания с зонным горением, где оптимизируется распределение топлива, в регулируемых камерах сгорания воздух перераспределяется по зонам при изменении режима работы двигателя. На режимах максимальной тяги необходимо значительную часть воздуха направлять в переднюю часть жаровой трубы для ограничения максимальной температуры для минимизации образования  $NO_x$  и сажи, а также для организации пристеночного занавеса для охлаждения жаровой трубы. В меру дросселирования двигателя все большую часть воздуха следует направлять в зону разбавления, поддерживая тем самым при уменьшении затраты топлива уровень температуры в первичной зоне в интервале, который обеспечивает допустимые значения выбросов. Камеры сгорания сменной геометрии целесообразно применять в сочетании с системами предыдущего впрыскивания и смешивания для избежания локальных горячих и холодных зон, где, соответственно, образуются  $NO_x$  и  $CO$ . Такое объединение дает возможность получить максимальный эффект снижением выбросов загрязняющих веществ. Предыдущая подготовка бедной смеси методом полного испарения и качественного смесеобразования к началу горения создает в первичной зоне гомогенную смесь с повышенным коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha > 1,0$ ). Повышение коэффициента снижает температуру реакции, а гомогенизация смеси отстраняет в зоне горения локальные горячие участки, которая заметно снижает образование  $NO_x$ . При такой подготовке смеси необходимо учитывать возможность «бедного» срыва пламени, особенно на режимах дросселирования двигателя.

Уменьшение выброса  $NO_x$  в каталитических камерах сгорания достигается за счет важного снижения температуры в зоне горения

(на  $\sim 1000$  К). Одним из недостатков таких камер сгорания есть необходимость прогревания катализатора до температуры его активизации при «холодных» запусках двигателя.

Уменьшение выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$ , наоборот, нуждается в повышении температуры в зоне горения, в частности на режиме малого газа, с обеспечением высокой полноты сгорания ( $\eta_c > 0,99$ ). Сравнительно низкие уровни выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$  имеют новые конструкции камер сгорания [94, 120, 14]: с теплозащитным покрытием жаровой трубы с двойной стенкой (без пристеночного воздушного занавеса); с регенеративным воздушным охлаждением жаровой трубы всем количеством первичного воздуха, который предварительно проходит через кольцевой канал вдоль всей жаровой трубы в виде против течения, прежде чем попасть вглубь через завихритель и отверстия первичной зоны (начальная температура воздуха за счет этого повышается на  $50 \dots 100$  К, тем самым ускоряя химические реакции, а так же, уменьшая количество вредных выбросов); с каталитическим конвертором в виде керамических решеток с каталитической облицовкой за первичной зоной, в котором догорают  $CO$  и  $C_nH_m$ .

Важным этапом в создании камеры сгорания есть прогнозирование ее характеристик выброса. Учитывая то, что  $CO$ ,  $C_nH_m$  и сажа – это промежуточные продукты в реакциях окисления топлива, практически тяжело обеспечить необходимую точность расчета их выхода, из-за чрезмерной сложности математических моделей с полным описанием всех механических, термодинамических и химических процессов в зависимости от пространственных координат в объеме камеры сгорания. Поэтому до сих пор наиболее результативным есть создания полуэмпирических и эмпирических моделей. В одной из таких моделей предполагается, что концентрации  $CO$  и  $C_nH_m$  в выхлопных газах пропорциональны произведению четырех величин, которые учитывают такие факторы:

– уменьшение концентрации данного вещества за зоной горения

вследствие подведения воздуха в зоне разбавления;

- среднее время пребывания в зоне горения;
- скорость химических реакций;
- скорость смещения.

Концентрация в выхлопных газах любого вещества, которое образовалось в зоне горения, пропорциональна частице  $f$  суммарной затраты воздуха, который принимает участие в горении. Среднее время пребывания в зоне горения определяется как:

$$\tau \approx \frac{L_{зг}}{c_{ср}} = \frac{L_{зг} \rho F}{f G_B} = \frac{p V_{зг}}{f G_B R T}$$

Скорость химической реакции зависит только от давления и температуры в зоне горения:  $r \sim p^y \exp(z)$ , а скорость смешивания – от перепада давления на стенках жаровой трубы:  $r_{зм} \sim (\Delta p_{ж}/p)^x$ , где  $x, y, z$  – константы, для определения  $CO$  и  $NO_x$ . После преобразования объемных концентраций выбросов в выхлопных газах, с учетом экспериментальных данных, которые дают возможность определить некоторые константы  $A$  и  $C$ , определяют следующие величины (%):

$$NO = \frac{A V_{зг} p^{1,2} \exp(0,009 T_{пз})}{G_B T_{пз} \sqrt{\frac{\Delta p}{p}}} \cdot 10^{-4} \quad ; \quad (1.2)$$

$$CO = \frac{C f^2 G_B T_{пз} p^b \sqrt{\frac{\Delta p}{p}}}{V_{зг} \exp(c T_{пз})} \cdot 10^{-4} \quad , \quad (1.3)$$

где  $V_{зг}$  – объем зоны горения,  $m^3$ ;  $T_{пз}$  – температура первичной зоны;  $f$  – частица воздуха, который принимает участие в горении;  $A, C$  – константы (коэффициенты пропорциональности);  $b$  и  $c$  – величины, зависимые от комбинации форсунки и жаровой трубы.

Выражения (1.2) и (1.3) дают возможность не только прогнозировать выбросы, но могут использоваться при создании камер сгорания с низкими

уровнями выбросов, поскольку достаточно наглядно характеризуют влияние термодинамических и геометрических параметров камеры сгорания на выбросы  $CO$  и  $NO$ . Отсутствие числовых значений констант не дает возможность воспользоваться уравнениями (1.2) и (1.3) в расчетах. Поэтому, учитывая зависимость общих образований  $CO$  и  $C_nH_m$  от неполноты сгорания топлива согласно выражению (1.1) и с учетом результатов экспериментальных исследований традиционных конструкций камер сгорания некоторых авиационных двигателей [41, 128, 129] из соотношения выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$ , могут быть получены формулы, г/кг:

$$EJ_{CO} = \sqrt{23,2^2 + 2 \cdot 10^5 (1 - \eta_f)} - 23,2, \quad (1.4)$$

$$EJ_{CH} = 0,005 EJ_{CO}^2. \quad (1.5)$$

Для прогнозирования выбросов  $NO_x$  в результате обобщения экспериментальных данных получено выражение зависимости времени пребывания и температуры воздуха на входе в камеру, которая в значительной мере определяет температуру пламени вместе с  $\alpha_2$  и степенью неравномерности смеси:

$$EJ_{NO} = (0,06 + 0,005 \tau_{пер}) \cdot e^{0,00736 T_k^*}. \quad (1.6)$$

Время пребывания обычно изменяется в пределах  $\tau_{пер} = 2 \dots 10$  мс. Отсутствие в формуле (1.6) зависимости выбросов  $NO_x$  от давления в камере сгорания объясняется постоянством давления в реакции окисления азота  $N_2 + O_2 = 2NO$ .

Установлено [10], что выбросы авиационных двигателей зависят от атмосферных условий. В частности, снижение температуры и увеличение влажности атмосферного воздуха приводят к уменьшению выброса  $NO_x$  и к увеличению выбросов  $CO$  и  $C_nH_m$ . Поэтому во время анализа экологических характеристик двигателей в общем случае необходимо было бы пользоваться выбросами, приведенными к стандартным атмосферным условиям. Формула удельного выброса для оксидов азота:



$$E_{\text{NO}_x} = E_{\text{NO}_x} \exp[K_T(T_{\text{кр}}^* - T_k^*)], \quad (1.7)$$

где  $K_T = f(\pi_k^*) = 0,001735 + 0,000107 \pi_k^*$  – температурный коэффициент;  $T_{\text{кр}}^*$  и  $T_k^*$  – температуры воздуха на входе в камеру сгорания за стандартных атмосферных условий и во время измерений соответственно;  $\pi_k^*$  – степень повышения давления в компрессоре.

Полученные в формулах (1.4)...(1.7) значения удельных выбросов используются в расчетах уровней выбросов за взлетно-посадочный цикл по формуле (1.1) для проверки соответствия нормам ИКАО [93] или непосредственно сравниваются с допустимыми удельными выбросами за нормативными документами.

#### **1.4. Методы улучшения физико-химических свойств авиационных топлив**

Концепция влияния электромагнитного поля на молекулы углеводного топлива, была исследована со времён Ван-дер-Ваальса. Углеводороды имеют длинные сильно разветвленные цепи атомов углерода, которые склонны к загибанию и замыканию, как на собственные атомы так и на близлежащие молекулы, из-за существующего межмолекулярного электромагнитного взаимодействия между ними. Подвергая эти сложные кластерные группировки действиям электромагнитного поля соответствующей силы и направления, удастся уменьшить вязкость топлива, обеспечить надлежащее перемешивание топливо-воздушной смеси, снизить энергозатраты на испарение топлива, и повысить скорость горения. Это объясняется тем, что все вещества подвергаются действию электромагнитного поля в большей или меньшей степени. В случае углеводных топлив электромагнитное поле переводит атомы молекул в возбужденное положение, которое приводит к их переориентации согласно направления действия внешнего магнитного поля. Также в процессе переориентации происходит увеличение расстояния между атомами и рост реакционной поверхности топлива и как следствие повышения полноты сгорания [37].

Исследования [113, 114] положительного влияния магнитного воздействия на эксплуатационные свойства реактивных топлив Т-1, ТС-1. Эти исследования показали, что при напряженности магнитного поля 560...640 кА/м и оптимальной скорости перемещения реактивного топлива 0,5...0,7 м/с смазывающие свойства топлива Т-7 улучшаются при трении скольжения на 12...15 %, а при трении качения – в 2...2,5 раза. Долговечность подшипников качения в среде керосина после магнитной обработки увеличилась в 2,7 раза. При напряженности магнитного поля 320 кА/м уменьшилась склонность углеводородного топлива к электризации примерно в 2 раза. Окисляемость реактивного топлива, подвергнутого воздействию постоянного магнитного поля напряженностью 640кА/м, уменьшается в 1,5...2 раза.

Воздействие электромагнитных полей на авиационное топливо приводит к повышению вязкости до 3 %, по сравнению с исходным значением, при точности измерения 0,17 %. Эта вязкость сохраняется в течение 5...6 часов, а затем постепенно в течение суток приближается к исходному значению. В зависимости от режима воздействия электро-магнитных полей вязкость топлива можно повысить или снизить.

Воздействие на масло МК-8 [114] магнитного поля напряженностью 480 кА/м при скорости течения масла 0,9 м/с позволяет уменьшать износ стали ШХ15 в среде этого масла в 3,0...3,5 раза. При этом критическая осевая нагрузка схватывания увеличивается на 20 %.

При исследовании противоизносных свойств различных масел (авиационного, промышленного, цилиндрического и автотракторного) [8] авторы отмечают, что пропускание смазочного масла через магнитное поле соленоида, способствует уменьшению износа колесных пар в 4-6 раз. Аналогичные результаты получены и при исследовании износа валов.

По данным исследования [141] для увеличения химической активности газообразного кислорода при окислении углеводородных топлив рекомендуется

магнитное воздействие. При этом эффективность сгорания бензина в автомобильном двигателе возрастает.

Исследования магнитного воздействия на бензин рассматриваются в работе [34]. Японскими исследователями отмечено уменьшение закопоти рапылителя, снижение нагара и концентрации сажи. Уменьшается дымность и зольность, снижается выброс окислов азота. Магнитная обработка бензина увеличивает скорость горения, что сказывается на максимальном давлении сгорания и при этом полнота сгорания увеличивается. Проведенные испытания на автомобилях марок "Toyota", "Honda", "Nissan" показали, что в результате магнитной обработки топлива пробег на одном литре бензина увеличивается в среднем на 12 %.

В работе [49] выдвинута гипотеза возможности влияния внешних магнитных полей (постоянных и переменных) на скорость окисления углеводородов в жидкой фазе при малых глубинах превращения. По мнению авторов, смысл влияния магнитного поля заключается в изменении доли выхода радикалов из образовавшейся пары.

Экспериментальными исследованиями и развитием теоретических представлений [59] доказано влияние слабых магнитных полей, в пределах 3,2...80кА/м, на скорость и селективность химических процессов в конденсированной фазе в целом ряде практически важных химических процессов. Результаты работы открывают новые возможности изучения и управления реакциями радикалов и возбужденных молекул.

На основании многочисленных опытов [112] показана важность ориентации исследуемого объекта по отношению к магнитным полюсам. На основании исследований [112] было обнаружено, что любая реакция, процесс или изучаемое свойство у одного и того же объекта изменяются в зависимости от его ориентации относительно вектора геомагнитного поля.

Под воздействием магнитного поля реакционная способность парамагнитных соединений должна увеличиваться. Подтверждения этого

приведены в работах [50]. При пропускании кислорода через магнитное поле происходит увеличение его реакционной способности, что приводит к активизации реакции окисления углеводородного топлива и других органических соединений. По данным работы [50] магнитное воздействие изменяет скорость реакции фотоокисления ароматических углеводородов.

Кроме магнитного воздействия на углеводородные среды в некоторых работах рассматриваются вопросы, связанные с изменением физических и эксплуатационных характеристик топлива и масла после других видов воздействия.

В работе [127] приводятся данные исследований влияния ультразвука на состав авиационного керосина. Авторы предполагают возможность перегруппировки предельных и непредельных углеводородов в керосине за счет облучения его интенсивным ультразвуком, так как в органических соединениях ультразвук ускоряет реакции окисления – восстановления, вызывает внутримолекулярные перегруппировки, возникает распад химических связей с образованием свободных радикалов. Как отмечается в работе, ультразвук приводит к нарушению химических связей, что позволяет в широком интервале изменить углеводородный состав топлива в сторону увеличения непредельных углеводородов. Облучение ультразвуком оказывает влияние на теплотворную способность, температуру вспышки, плотность и процентное содержание ароматических углеводородов. При различных условиях облучения ультразвуком йодное число возрастает с уменьшением температуры облучаемого керосина. Наибольшая эффективность воздействия проявляется при температуре топлива 283...286 К и времени облучения 10 минут. Эффект сохраняется в течении нескольких часов и даже суток после воздействия ультразвука на керосин.

Работа [127] посвящена исследованию влияния ультрафиолетовых лучей на противоположные свойства реактивных топлив. Топливо пропускали через кювету, изготовленную из кварцевого стекла, на которую был направлен пучок лучей от лампы ПРК-2. Авторы отмечают, что облученный керосин имеет

лучшую смазывающую способность. Очевидно, при облучении топлив ультрафиолетовыми лучами в них накапливаются продукты окисления, которые являются поверхностно-активными веществами.

Повышения качества дизельного топлива [130] осуществляют с помощью лазерного УФ-излучения. Сущность предложенного способа заключается в том, что полученное дизельное топливо подвергают воздействию лазерного излучения длиной волны 1,06 мкм и мощностью 100...150 Вт с помощью специального устройства.

Влияние ионизации на электрические и механические свойства индустриальных масел были исследованы в работе [109]. Под влиянием ионизирующего гаммаоблучения снижается электрическое сопротивление, повышается кислотность и вязкость облученного масла. Облучённые масла имеют повышенные противоизносные свойства, при этом критическая осевая нагрузка схватывания увеличивается. Регулируя степень ионизации, можно изменять глубину происходящих в масле процессов и получать масла с определенными эксплуатационными свойствами. Облучению  $C_0^{60}$  дозами от 70 до  $10^6$  рад подвергались индустриальные масла. Отмечается повышение износостойкости и возрастание нагрузки заедания для стали ШХ 9 в среднем на 15...20%, при этом доза облучения для масла была 275...350 рад. Зона пятна износа после облучения масла окружена более плотной защитной пленкой из поверхностно-активных веществ. Наибольший эффект (до 30...50%) в условиях трения скольжения был обнаружен для пар трения бронза-сталь и латунь-чугун.

Повышение эксплуатационных показателей авиационного и автомобильного транспорта является проблемой комплексной и решение ее достигается на всех стадиях разработки, проектирования, конструирования, производства и эксплуатации транспортных средств. Во многом уровень надежности при эксплуатации авиационной и автомобильной техники зависит от потенциальных свойств заложенных на стадии проектирования и

производства двигателей. Однако в условиях реальной эксплуатации заложенный уровень надежности теплового двигателя полностью не реализуется. Происходит это вследствие влияния следующих внешних факторов: климатических, почвенно-дорожных условий, низкого уровня технической эксплуатации (нарушение объема и регламента проведения операций технического обслуживания, применение топлива с низкими эксплуатационными свойствами) и др.

Одним из важнейших условий реализации надежности и долговечности теплового двигателя является применение высококачественных сортов топлива с улучшенными эксплуатационными свойствами, т.к. именно эти свойства зачастую решающим образом влияют на эффективность применения разнообразной техники. Взаимосвязь между эксплуатационной надежностью, долговечностью двигателя и качеством применяемых топлив очевидна.

В свете решения задач интенсификации использования авиационного и автомобильного парка в различных сферах функционирования, повышению эффективности и производительности транспортных средств, снижению затрат на их эксплуатацию разрабатываются и применяются энергетические установки с более высокой агрегатной мощностью, используются энергоресурсосберегающие технологии технического обслуживания, разрабатываются методы и средства повышения эксплуатационной надежности транспортных средств. Предъявляются высокие требования к качеству технического обслуживания и ремонта, точности регулировок, чистоте и эксплуатационным свойствам топлива и смазочного материала при эксплуатации мобильных высокопроизводительных установок. Обеспечение требуемого технического состояния тепловых двигателей находится в прямой связи с экономией топлива, смазочных материалов и загрязнением окружающей среды вредными выбросами тепловых двигателей.

При современных масштабах применения тепловых двигателей изменение даже доли процента использования энергетического потенциала

топлив приводит к экономии тысяч тонн горючего. Несоответствие показателей качества топлив и смазочных масел конструкции двигателя могут привести не только к перерасходу горюче-смазочных материалов, но и к сокращению надежности двигателя. Существенная экономия топлива (энергетического сырья) может быть достигнута за счет снижения удельных и эксплуатационных расходов путем совершенствования конструкции двигателей и за счет использования более высококачественных топлив, с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Важнейшими эксплуатационными свойствами углеводородных топлив и масел, влияющих на эксплуатационные показатели являются: энергетические свойства, воспламеняемость, детонационная стойкость, склонность к нагаро- и лакообразованию, физическая и химическая стабильность, испаряемость, низкотемпературные свойства, полнота сгорания, противоизносные и противозадирные свойства, чистота (механические примеси), экологические и другие свойства.

Одним из наиболее важных эксплуатационных показателей является износ трущихся деталей, работающих в условиях граничного трения. В целом ряде случаев им лимитируются долговечность и надежность работы машин и механизмов. Особое внимание с точки зрения экологии заслуживает вопрос снижения содержания токсичных веществ в отработавших газах двигателя, которые являются продуктами неполного сгорания или побочных реакций, протекающих при высоких температурах и во многом зависящих от качества применяемых топлив.

К числу важных современных проблем повышения эксплуатационной надежности транспортных средств относится обеспечение требуемой чистоты горюче-смазочных материалов (в баках, двигателях, узлах и агрегатах техники). Проблема многоплановая. Она включает в себя прежде всего обоснование требуемой чистоты топлив по пути от НПЗ до конечного места использования в

технике, а затем разработку технологических путей и средств (фильтров, аппаратов и др.) обеспечения этой чистоты.

Механические примеси в топливах влияют на износ топливной аппаратуры, цилиндро-поршневой группы в поршневых двигателях. Кроме того, они могут вызывать засорение каналов и жиклеров карбюратора, увеличивать сернистых и смолистых отложений, нагарообразований во впускном трубопроводе, в камерах сгорания и на клапанах, нарушать плотность посадки иглы на седло распылителя форсунки и т.д. Все это снижает надежность работы двигателя.

Таким образом, вопросы качества топлива имеют решающее значение в определении перспектив развития двигателестроения. Научное обоснование требований к качеству топлив и масел, оценка важнейших их эксплуатационных свойств – все это приобретает первостепенное значение в технической эксплуатации автомобильного транспорта.

В настоящее время вопросы улучшения эксплуатационных свойств топлив и масел решаются, в технологическом и рецептурном направлениях, а также путем поиска оптимальных условий хранения и усовершенствования заправочных средств. Наряду с этим, как в отечественной, так и зарубежной практике улучшение эксплуатационных свойств, уже готовых топлив и масел, ведется по пути применения рецептур различных присадок, которые наряду с положительным влиянием имеют ряд существенных недостатков: узкое специфическое назначение большинства присадок, высокую их стоимость, потребность в сложных технологических линиях для их производства. Исследования американских и японских специалистов показали, что добавки в топливо, снижающие токсичность отработавших газов, в свою очередь ведут к образованию новых токсичных веществ. Поэтому традиционные способы улучшения качества топлива за счет введения в них различного рода присадок, не всегда удовлетворяют требуемому условию улучшения эксплуатационных свойств топлива.



В связи с этим прорабатываются различные пути решения проблемы улучшения эксплуатационных свойств топлива безреагентными способами, т.е. повышение мощности и экономичности двигателей за счет использования топлив с повышенным "энергозапасом".

В последнее время созданы предпосылки для промышленной разработки новых способов и наиболее перспективных направлений улучшения показателей работы двигателя. Так, для изменения физико-химических, эксплуатационных и экологических свойств жидких систем широко исследуются способы электрофизического воздействия, такие как: магнитные и электрические поля, токи высокой частоты, ультразвук, ультрафиолетовое и  $\gamma$ -облучение, лазерное излучение и т.д.

Из перечисленных способов наибольшее распространение в отечественной и зарубежной промышленности получило применение магнитного поля и ультразвука. Особое место в связи с простотой технического решения и высокой экономической эффективностью, получил способ магнитного воздействия. Сущность его заключается в том, что технологическая жидкость (топливо) с определенной скоростью пропускают через устройство, в котором созданы магнитные поля (постоянные или переменные) с известными характеристиками и топографией поля, в результате чего она приобретает повышенный "энергозапас" влияющий на эксплуатационные свойства топлива и масла.

Однако до настоящего времени нет определенного научного объяснения электромагнитного воздействия на жидкие системы. Противоречивость известных из литературы данных обусловлена случайным выбором конструкции устройств, режимов воздействия и отсутствием текущего контроля. Ни один из аппаратов для магнитного воздействия не изготовлен на основании экспериментально полученных зависимостей или достаточно обоснованных теоретических предпосылок.

Задачи, решаемые при электрофизическом воздействии на жидкие системы широки и разнообразны. Они предусматривают изыскание и рациональное использование направленного изменения физико-химических и эксплуатационных свойств жидких систем с помощью внешних физических и электрофизических воздействий.

### **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1**

На основе проведенного анализа современного состояния проблемы улучшения параметров и характеристик тепловых двигателей можно сделать вывод, что модифицирование эксплуатационных свойств углеводородного топлива является одним из путей повышения эффективности и экологичности тепловых двигателей. В меньшей степени исследован электрофизический метод модификации эксплуатационных свойств топлива.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕВОДОРОДНЫЙ ТОПЛИВ

### 2.1. Магнитные воздействия на характеристики углеводородного топлива

Исследование различных методов воздействия на физико-химические свойства углеводородных топлив предназначено для обеспечения надежной эксплуатации тепловых двигателей, снижения расхода топлива и уменьшения токсичности отработавших газов в условиях эксплуатации.

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации тепловых двигателей показывает, что качество применяемых топлив оценивается по их физико-химическим, эксплуатационным и экологическим свойствам. К физико-химическим относятся свойства, определяющие физические и химические свойства топлив и смазочных материалов, а также их состав. Это – плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость, элементный, фракционный и химический составы; давление насыщенных паров и другие. [14, 15, 95].

Современные топлива и смазочные материалы, полученные из нефтяного сырья, являются чрезвычайно сложной смесью углеводородов. Практически во всех типах топлива присутствуют неуглеводородные соединения. К ним относятся: кислородосодержащие, сернистые и азотистые соединения, твердые микрозагрязнения и растворимые элементарно-органические соединения. Серы, кислорода и азота в топливах обычно содержится от долей процента до 1...2%. Несмотря на это, в силу отличия их свойств от свойств углеводородов неуглеводородные соединения существенно влияют на эксплуатационные свойства тепловых двигателей. Поэтому для получения достоверных результатов при исследовании ЭФВ на эксплуатационные свойства горюче-

смазочных материалов необходимо знать изменения их физико-химических свойств.

Существующие жидкие углеводородные среды по условиям применения в тепловых двигателях можно разделить на:

- автомобильные и бензины и масла, для поршневых двигателей с искровым зажиганием;
- дизельные топлива и масла, для двигателей с воспламенением при сжатии;
- реактивные топлива и масла, для воздушно-реактивных двигателей.

В связи с широким изучением влияния электрофизического воздействия на топливо и смазочные материалы в качестве объектов исследования были использованы: автомобильные бензины АИ-92 и АИ-95 [12]; авиационные топлива ТС-1 [86], РТ [85], Т-8В [111]; дизельные топлива Л-0,2-40, Л-0,5-40 [109]; маловязкое дистиллятное масло МС-8п [61]. Выбор этих углеводородных сред основывается на учете различия их физико-химических и эксплуатационных свойств.

По электрофизическим свойствам углеводородные среды относятся к диэлектрикам и обладают очень малой электрической проводимостью. Диэлектрическая проницаемость топлив зависит от фракционного состава: для бензинов находится в пределах –  $\varepsilon = 1,980 \div 2,055$ , для керосинов –  $\varepsilon = 2,050 \div 2,095$ ; для дизельных топлив –  $\varepsilon = 2,160 \div 2,195$ . Основы нефтяных масел, как правило, составляют высококипящие фракции нефти, поэтому и значение диэлектрической проницаемости их  $\varepsilon = 2,200$  и выше.

В работе исследуется механизм магнитного воздействия на атомные частицы углеводородных топлив с целью оценки эффективности этого воздействия на эксплуатационные свойства топлив и процессы в камерах сгорания тепловых двигателей.

Электроны атома и ядра некоторых элементов ( $H^1$ ,  $C^{13}$ ,  $O^{17}$ ,  $P^{31}$ ,  $Li^7$ ,  $F^{19}$  и ряд других) обладают магнитным и механическим моментами. Спин

электрона проявляется в виде тонкой структуры в атомных спектрах. В случае ядер это свойство обнаруживается в виде сверхтонкой структуры. Магнитный момент электрона взаимодействует с магнитным моментом ядра. Энергия взаимодействия зависит от взаимной ориентации спинов или магнитных моментов, а количество возможных ориентаций определяется спином ядра. Суммарный спин ядра зависит от того, компенсируют друг друга спины составных частей ядра или нет.

В магнитном поле магнитные моменты протона со спином  $I = \pm 1/2$  ориентируются лишь двумя способами – по направлению поля или против направления поля. Каждое ядро, обладающее магнитным моментом, попадая в магнитное поле, приобретает зеемановскую дополнительную энергию –  $\mu H_0$ . Гамильтониан  $\mathcal{H}$  в этом случае имеет вид [25, 26]:

$$\mathcal{H} = -\mu_n H_0 ,$$

где  $\mu_n$  – магнитный момент протона, равен  $1,41 \cdot 10^{-26}$  Дж/Тл;  $H_0$  – напряженность магнитного поля, А/м.

Пусть поле  $H_0$  направлено вдоль оси  $Z$  системы координат (рис. 2.1).

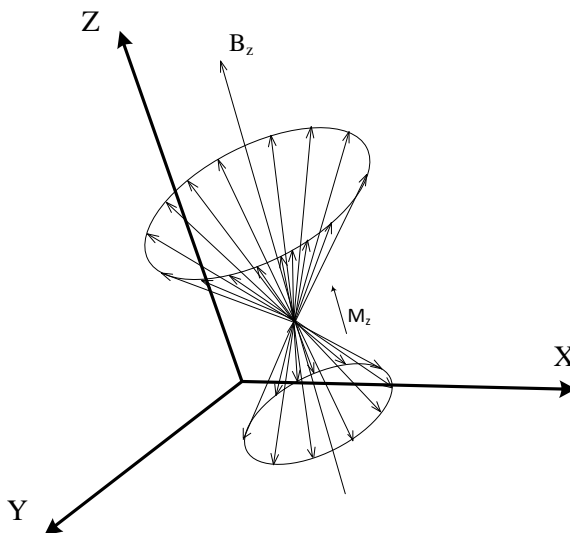


Рис. 2.1. Направления напряжённости магнитного поля

Тогда зеемановское взаимодействие описывается гамильтонианом:

$$\mathcal{H} = -\gamma h H_0 I_z ,$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение ядра, для  $H^1$   $\gamma_1 = 42,57$  МГц/Тл;  $h$  – постоянная Планка, равна  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·сек;  $I_z$  – спиновый момент ядра.

При изменении полного момента ядра существенно изменяется его состояние, т.е. изменяется его внутренняя энергия. Из принципов статистической физики следует, что отношение чисел протонов  $n$  с различными ориентациями магнитных моментов равно:

$$\frac{n_{(+\mu)}}{n_{(-\mu)}} = e^{\frac{2\mu H}{kT}}, \quad 2.1$$

где  $T$  – абсолютная температура жидкости, К;  $n_{(+\mu)}, n_{(-\mu)}$  – населенности уровней;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Ядерная поляризация  $P$  в обычных условиях бывает незначительной из-за малости  $\mu_n$  и определяется из выражения:

$$P = \frac{n_{(+\mu)} - n_{(-\mu)}}{n_{(+\mu)} + n_{(-\mu)}}. \quad 2.2$$

При увеличении напряженности внешнего магнитного поля увеличивается разность энергии для спина, направленного против поля и спина, направленного по полю, что приводит к возрастанию поляризации. Однако это выстраивание спинов происходит не сразу. До наложения магнитного поля число спинов, направленных "вверх" и "вниз", было одинаковым, а затем в поле часть спинов, направленных против магнитного поля, переворачивается.

Переориентация ядерного спина сопровождается изменением его энергии, поэтому она может происходить только в присутствии какого-либо объекта, с которым ядро обменивается энергией. Такими объектами могут быть электроны, соседние ядра, парамагнитные элементы (кислород и др.), ионы, свободные радикалы или радиочастотный контур с высокой добротностью, настроенный на частоту прецессии ядер во внешнем магнитном поле.

В объеме вещества имеется направленный вдоль внешнего поля суммарный магнитный момент ядер  $M$  (намагниченность):

$$M = \mu[n_{(+\mu)} - n_{(-\mu)}].$$

Используя выражение (2.1), можно записать:

$$\frac{n_{(+\mu)} - n_{(-\mu)}}{n_{(+\mu)} + n_{(-\mu)}} = \frac{e^{\frac{2\mu H}{kT}} - 1}{1 + e^{\frac{2\mu H}{kT}}}, \quad 2.3$$

а т.к. обычно  $\frac{2\mu H}{kT} \ll 1$ , то  $e^{\frac{2\mu H}{kT}} \approx 1 + \frac{2\mu H}{kT}$ .

Откуда для общего числа ядер в единице объема вещества  $n_0$  магнитный момент  $M$  равен:

$$M = \frac{\mu^2 H_0 n_0}{kT}. \quad 2.4$$

Скорость изменения намагниченности ядер  $M$  в магнитном поле  $H_0$  определяется выражением:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\chi_0 H_0 - M}{T_1}, \quad 2.5$$

где  $\chi_0$  – статистическая магнитная восприимчивость ядер;  $T_1$  – время продольной релаксации.

Экспериментально установлено, что намагниченность достигает своей равновесной величины за время порядка  $3T_1$ , т.е. если вещество в течение времени, гораздо больше  $T_1$  находилось в сильном магнитном поле  $H_0$ , то равновесная намагниченность ядер равна:

$$M = \chi_0 H_0.$$

Резкое уменьшение напряженности магнитного поля до величины  $H'_0$  приводит к тому, что намагниченность меняется со скоростью, определяемой выражением (2.5). При ускоренной релаксации ядер в присутствии парамагнитных частиц и свободных радикалов энергия, поглощенная ядром при его переориентации во внешнем магнитном поле, поглощается находящимися вблизи ядер неспаренными электронами.

Обычно среди химических соединений редко встречаются такие, где имеется неспаренный электронный спин. Происходит это из-за химической активности таких веществ. Химическая связь, как правило, обеспечивается электронами с противоположно направленными спинами, т.е. полный спин химического соединения равен нулю.

В реальных объектах (углеводородные жидкости, вода) присутствуют атомы с отличным от нуля электронным спином, это парамагнитные центры – кислород, свободные органические радикалы и др. Спины электронов парамагнитных центров взаимодействуют со спинами ядер основного химического соединения, куда помещены эти центры. Поэтому релаксационные спиновые переходы будут совершаться в основном за счет взаимодействия ядерных спинов с электронными. Однако ядерные спины взаимодействуют не только со спинами электронов, но и друг с другом.

Ядерные спины очень слабо связаны с тепловым движением частиц в образце, и заселенности ядерных спиновых уровней очень медленно приходят к своим равновесным значениям. В частности, согласно теории Бломбергера, время ядерной релаксации  $T_e^3$ , обусловленное только магнитным дипольным взаимодействием ядерных моментов, равно 109 с. Если учесть релаксацию на стенках сосуда, то эта величина уменьшается до  $4 \cdot 10^3$  с, оставаясь все же достаточно большой.

Увеличение поляризации ядер за счет изменения ориентации спинов протонов неизбежно должно вызвать переориентацию электронных спинов в молекулах в основном за счет контактного сверхтонкого взаимодействия, что в свою очередь повлияет на физические свойства жидкости. При этом большую роль играет взаимодействие ядерных спинов с электронной структурой вещества, взаимодействие между ядерным и электронным магнитными моментами.

Спин ядра взаимодействует с электронами тремя путями:



1. В результате воздействия магнитного поля ядерного диполя на орбитальные магнитные моменты электронов возникают электронные токи. Соответствующий член в гамильтониане равен:

$$\mathcal{H} = q_n \beta_n \beta \frac{2L \cdot I}{r^3},$$

где  $q_n$  – ядерный g-фактор;  $\beta_n$  – магнетон Бора;  $\beta$  – состояние протона ( $-1/2$ );  $I$  – спин ядра;  $L$  – орбитальный угловой момент электрона;  $r$  – расстояние между магнитными моментами.

2. Дипольное взаимодействие между электронным спином и ядром поляризует электронные спины в той части молекулы, которая близка к ядру за счёт относительно сильных взаимодействий СТС электронных спинов с ядрами того же атома.

3. Наиболее важным взаимодействием является контактное, в результате которого спины электронов в атоме стремятся расположиться антипараллельно ядерному спину. Так как электронные спины в разных частях молекулы взаимодействуют через химическую связь, то электронная спиновая поляризация на ядре сопровождается образованием небольшого избытка электронов в состоянии  $+1/2$  или  $-1/2$  на другом ядре, которое ориентирует свой спин антипараллельно или параллельно спину первого ядра.

Константа спин-спинового взаимодействия протонов в водородосодержащих молекулах исключительно велика и взаимодействие последовательно передается через несколько связей. Пути, по которым возмущение, созданное ядерным спином, передается электронному облаку молекулы, могут быть самыми различными для различных соединений.

Ядро возмущает валентные электроны. Спины электронов, контактным образом взаимодействующих со спином ядер, выстроены обменным взаимодействием. Поэтому упорядочивающее воздействие таких электронов будет особенно сильным, так как воздействия от разных электронов складываются. Благодаря взаимодействию ядерных магнитных моментов с

магнитными моментами электронов, спины электронов могут переворачиваться, и, в конце концов, устанавливается равновесная заселенность энергетических уровней.

Поляризация ядер проточной жидкости постоянным магнитным полем достигается за счет пропускания ее в межполюсном пространстве магнита. При этом поляризующая система создает в жидкости, протекающей через магнитное поле, намагниченность ядер  $M$ , отличную от равновесий.

Увеличение поляризации ядер наиболее просто осуществляется за счет воздействия сильного магнитного поля в течение заданного времени. Как указывалось выше, время воздействия магнитного поля должно быть порядка  $3T_1$ .

Как следует из выражения (2.4), величина намагниченности, а, следовательно, и поляризация пропорциональна величине поля.

Таким образом, поляризация жидкости определяется конструктивными особенностями устройства для создания магнитного поля.

Конструкция магнитного устройства для воздействия на жидкость в динамических условиях должна обеспечивать одинаковую скорость подачи жидкости по сечению объема и создание возможности более длительного времени нахождения ее в зоне действия магнитного поля при одном и том же расходе. При выполнении этого условия время  $t$  пребывания жидкости в поляризующем поле равно:

$$t = \frac{V_n}{q},$$

где  $V_n$  – объем межполюсного пространства поляризатора;  $q$  – расход жидкости.

Если напряженность магнитного поля поляризатора  $H_n$  одинакова в пределах устройства, то величина намагниченности  $M_z$  ядер в жидкости после магнитного устройства будет равна:

$$M_z = \chi_0 H_n (1 - e^{\frac{-V_n}{qT_1}}) + M_1 e^{\frac{-V_n}{qT_1}}.$$

Для получения максимальной поляризации жидкости, вытекающей из устройства, необходимо выполнить условие  $V_n/qT_1 \gg 1$ , а для того, чтобы  $M_1$  отличалось от максимальной величины  $\chi_0 H_0$  менее чем на 5%, надо чтобы  $V_n/qT_1 > 3$ .

Поляризацию ядер жидкости возможно обеспечить и за счет знакопеременного постоянного магнитного поля. В знакопеременном магнитном поле при повороте внешнего поля можно осуществить непрерывную инверсию намагниченности ядер в текущей жидкости. С этой целью необходимо создать такую топографию магнитного поля, чтобы на некотором участке траектории движения жидкости оно меняло знак, и чтобы при прохождении жидкости через этот участок намагниченность ядер успевала поворачиваться вслед за полем. При этом, если изменение направления магнитного поля происходит на участке длиной  $l$ , то при движении ядер жидкости со скоростью  $W$ , поворот поля осуществляется за время  $t$ . Поэтому, чтобы поляризация ядер успевала следовать за поворотом вектора внешнего магнитного поля, время должно быть больше периода прецессии ядер жидкости в момент поворота  $2\pi/\gamma H$ , где  $H$  – средняя напряженность поля на участке  $l$ ,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение. Расстояние  $l$  определяется геометрическими размерами устройства, обеспечивающего необходимую топографию магнитного поля.

Однако при этом необходимо соблюдать синфазность полей, т.е. чтобы при отдельных изменениях направления магнитного поля отклонение намагниченности ядер должно суммироваться, т.е. с каждой последующей зоной поляризация увеличивается. Это будет соблюдаться, если за время между поворотом поля угол прецессии намагниченности ядер составляет четное число  $\pi$ . Синфазность воздействия зависит от скорости движения жидкости, расстояния между зонами и градиентом  $dH/dx$ . При отсутствии синфазности и

предельного случая – противофазы, эффект воздействия уменьшается и может привести к исчезновению.

Таким образом, скорость движения жидкости через магнитное поле оказывается связанной со скоростью прецессии ядер. Время воздействия или общая длина магнитной зоны определяется временем релаксации, т.е. будет зависеть от физических свойств жидкости и наличия в ней примесей. Эти важные моменты не учитывались ранее при разработке устройств для магнитного воздействия, описанных в литературе.

## **2.2. Электрофизическое высокочастотное воздействие на углеводородное топливо**

Особую сложность при применении магнитного воздействия на жидкости представляет собой выбор оптимальных условий воздействия для получения максимального эффекта и экспресс-контроль свойств жидкости. Устройства, созданные для одних жидкостей, практически не пригодны для работы с другими жидкостями без предварительной перестройки, что не на всех устройствах может быть осуществлено. Нестабильность получаемого полезного эффекта и отсутствие текущего контроля над режимом воздействия ограничивает широкое применение магнитного метода в практике.

Для повышения универсальности магнитного метода воздействия на жидкие системы, а также для осуществления текущего контроля над процессом воздействия в работе предложен электрофизический высокочастотный способ воздействия, основанный на резонансном поглощении энергии ядерной системой в неоднородных магнитных полях.

Согласно представлениям квантовой теории для ядер диамагнитной жидкости, находящихся во внешнем магнитном поле  $H_0$  наиболее существенным является зеемановское взаимодействие, которое описывается гамильтонианом:

$$\mathcal{H} = -q_n \beta H_0 I = -\gamma \hbar H_0 I.$$

Энергетический спектр системы ядер состоит из  $2I + 1$  равноотстоящих магнитных подуровней энергии  $E_{(m)}$ :

$$E_{(m)} = -q_n \beta m H_0,$$

каждый из которых характеризуется волновой функцией  $\psi_{(m)}$ , где  $m = \langle I_z \rangle$ .

При электрофизическом высокочастотном способе воздействия, чтобы вызвать переходы между этими уровнями при протекании жидкости через зону неоднородного постоянного магнитного поля, на нее одновременно воздействуют высокочастотным переменным электромагнитным полем  $H_1$ . Частота переменного поля совпадает с частотой прецессии ядер в данном постоянном магнитном поле  $H_0$  и наблюдается избирательное поглощение энергии протонной системой жидкости [1, 131]:

$$\omega = \gamma H_0,$$

где  $\omega$  – частота прецессии ядер.

Ось  $x$  направлена вдоль вектора переменного электромагнитного поля, ось  $z$  – вдоль вектора постоянного магнитного поля.

После выхода жидкости из поляризующего поля она имеет проекции намагниченности на оси координат  $M_x, M_y, M_z$ .

В результате прецессии намагниченности под действием переменного электромагнитного поля  $H_1$  изменяется величина  $M_z$ , при этом скорость изменения  $M_z$  равна:

$$\frac{dM_z}{dt} = M_y \gamma H_1.$$

Скорость изменения  $M_x$  в результате прецессии намагниченности под действием постоянного поля  $H_0$  равна:

$$\frac{dM_x}{dt} = -(\gamma H_0 - \omega) M_y.$$

Вследствие этого величина  $M_y$  меняется со скоростью:

$$\frac{dM_y}{dt} = -M_z \gamma H_1 + M_x (\gamma H_o - \omega).$$

Полученные уравнения справедливы в течение промежутка времени, гораздо меньшего времени релаксации  $T_1$  и  $T_2$ . Продольная спин-решеточная релаксация  $T_1$  вызывает изменение намагниченности  $M_z$  со скоростью:

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{\chi_o H_o - M_z}{T_1},$$

а поперечная релаксация  $T_2$  вызывает изменение  $M_x$  и  $M_y$  со скоростью:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= -\frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} &= -\frac{M_y}{T_2} \end{aligned} \right\}.$$

Таким образом, изменение намагниченности ядер; находящихся в постоянном магнитном поле напряженностью  $H_0$  и под действием переменного электромагнитного поля  $H_1$ , изменяющегося с частотой  $\omega$ , описывается системой трех уравнений Блоха [13, 128]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= -(\gamma H_o - \omega)M_y - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} &= -M_z \gamma H_1 + M_x (\gamma H_o - \omega) - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} &= M_y \gamma H_1 + \frac{\chi_o H_o - M_z}{T_1} \end{aligned} \right\}.$$

Переменное электромагнитное поле  $H_1$  вызывает возмущение системы спинов, которое описывается гамильтонианом  $\mathcal{H}'$ :

$$\mathcal{H}'(t) = \mathcal{H} \cos \omega t = q_n \beta (I_x H_{1x} + I_y H_{1y} + I_z H_{1z}) \cos \omega t.$$

Если до включения переменного электромагнитного поля  $H_1$  в момент времени  $t = 0$  спин находится в начальном состоянии  $\psi(m)$ , то согласно первому приближению теории возмущений, зависящий от времени,

вероятность того, что при  $t = \tau$  спин будет находиться в состоянии  $\psi'(m')$ , равна:

$$|a(\tau)|^2 = \hbar^2 \left| \int_0^\tau \langle \bar{\psi} | \mathcal{H}'(t) | \psi' \rangle e^{i\omega't} dt \right|^2,$$

где  $\omega' = (E - E')/\hbar$ .

Так как изменение локального поля внутри системы спинов можно считать небольшим, то следует ожидать, что существует непрерывное распределение состояния с максимумами в окрестности  $E$  и  $E'$ . Это приводит к возникновению результирующего резонансного поглощения с максимумом вблизи резонансной частоты  $\omega_0 = q_n \beta H / \hbar$ .

Кроме возмущения, обусловленного переменным электромагнитным полем  $H_1$ , на спины протонов действует случайным образом изменяющееся во времени поле, описывающее, с феноменологической точки зрения, тепловые релаксационные взаимодействия спинов с решеткой. Это приводит к появлению некоторой конечной вероятности релаксационных переходов  $U(m \rightarrow m') c^{-1}$  зависящей некоторым образом от температуры решетки  $T$ , а также к установлению теплового равновесия энергетических уровней со своим окружением по закону Больцмана в отсутствие переменного электромагнитного поля  $H_1$ .

Иначе говоря, вероятности релаксационных переходов, обусловленных тепловыми процессами, должны быть соответственно пропорциональны больцмановским заселенностям в конечном состоянии.

Воздействие электромагнитного поля  $H_1$  вызывает интенсивные переходы "снизу вверх" и "сверху вниз" между уровнями и больцмановское распределение заселенностей нарушается. Но поскольку на низшем энергетическом уровне частиц больше, чем на верхнем, то переходов "снизу вверх" будет тоже больше, чем обратно. При этом увеличивается энергия

среды, а, следовательно, электромагнитная энергия поля  $H_1$  частично поглощается.

Спиновая система, поглотившая некоторую энергию, повышает свою энергию, а за счет спин-решеточной релаксации  $T_1$  происходит восстановление теплового равновесия со средой, т.е. с любым окружением, которым может быть и газ, и жидкость, и твердое тело.

При взаимодействии со средой все ядра со спином  $I = 1/2$  в образце создают локальные магнитные поля вокруг себя, с которыми взаимодействуют магнитные моменты неспаренных электронов.

Таким образом, рассматриваемую систему можно описать гамильтонианом:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_e + \mathcal{H}_n + \mathcal{H}_{ne},$$

где  $\mathcal{H}_e$  – гамильтониан слабо взаимодействующих электронов;  $\mathcal{H}_n$  – гамильтониан, включающий зеемановскую энергию ядер в постоянном магнитном поле  $H_0$  и энергию магнитного взаимодействия между ядрами;  $\mathcal{H}_{ne}$  – гамильтониан взаимодействия между ядерными и электронными спинами.

В установившемся состоянии разность населенностей  $n$  равна:

$$n = \frac{n_0}{1 + (\gamma H_1)^2 T_1 T_2},$$

где  $n_0$  – разность заселенностей при термическом равновесии.

Если устранить переменное электромагнитное воздействие на жидкость, то вероятность переходов "вниз" и "вверх" в единицу времени будет равна:

$$n = n_0 + C e^{-t/T},$$

где  $C$  – константа интегрирования.

Это уравнение удобнее записать в виде:

$$n - n_0 = (n - n_0)_0 e^{-t/T_1},$$



где  $(n - n_0)_0$  отклонение от теплового равновесия в начальный момент времени.

Из уравнения следует, что после возмущения разность заселенностей, а вместе с тем и суммарное намагничивание образца, возвращается к стационарному состоянию экспоненциально. При этом установление продольной компоненты ядерной намагниченности происходит в результате обмена энергии между системой ядерных спинов и молекулярной системой. Скорость этого обмена, а следовательно и установление продольной составляющей определяется интенсивностью спин-решеточного взаимодействия.

Мощность  $P$ , поглощаемая спинами из переменного электромагнитного поля, равна:

$$P = \hbar\omega W_n = \hbar\omega W \frac{n_0}{1 - (\gamma H_1)^2 T_1 T_2}.$$

Таким образом, измеряя потери на резонансной частоте  $\omega$  в катушке индуктивности, через которую протекает жидкость, можно обнаружить ядерное магнитно-резонансное поглощение, обусловленное переходами между магнитными подуровнями. В конечном счете, при резонансном поглощении спины переносят энергию от переменного электромагнитного поля к молекулярной системе жидкости.

Из разности заселенностей уровней следует, что вещество обладает магнитной восприимчивостью и комплексная восприимчивость образца равна:

$$\chi = \chi' - j\chi'',$$

где мнимая часть, которой  $j\chi''$  определяет поглощение мощности переменного электромагнитного поля на единицу объема образца. При этом связь между микроскопическими и макроскопическими свойствами можно установить, вычисляя среднее значение, поглощаемой в единицу времени, энергии  $P_\omega$  переменного электромагнитного поля  $H_1 \cos\omega t$ :

$$P_{\omega} = 2\omega\chi'' H_1^2 \cos\omega t.$$

Это равенство устанавливает простую зависимость между поглощаемой мощностью  $P$ , восприимчивостью  $\chi''$  и амплитудой переменного магнитного поля  $H_1$ . Величины  $\chi'$  и  $\chi''$  связаны друг с другом, т.е. вещественная часть комплексной восприимчивости – дисперсия  $\chi'$  выражается через  $\chi''$  с помощью соотношения Крамерса-Кронига [1, 118]:

$$\chi'(\omega) = \frac{1}{2} \chi_o \omega_o \frac{T_2^2 (\omega_o - \omega)}{1 + T_2^2 (\omega_o - \omega)^2 + \gamma_n^2 H_1^2 T_1 T_2};$$

$$\chi''(\omega) = \frac{1}{2} \chi_o \omega_o \frac{T_2}{1 + T_2^2 (\omega_o - \omega)^2 + \gamma_n^2 H_1^2 T_1 T_2};$$

где  $\chi_o$  – статическая восприимчивость Кюри,

$$\chi_o = \frac{N_v q_n^2 \beta I(I+1)}{3kT};$$

где  $N_v$  – число спинов в единице объема.

Величина  $\chi''$  резко возрастает вблизи резонанса и вызывает сильное резонансное поглощение энергии из колебательного контура высокочастотного генератора. При этом наблюдается сигнал абсорбции энергии, т.е. энергия, которая поглощается ядром при переходе с одного энергетического уровня на другой  $\Delta E = h\gamma H_o$ .

Жидкость, находящаяся достаточно длительное время в постоянном магнитном поле, имеет равномерную намагниченность ядер, направленную параллельно полю. Медленное изменение направления магнитного поля приводит к повороту вместе с ним и намагниченности ядер. Если же поворот магнитного поля осуществляется за время  $t$ , гораздо меньшее периода прецессии ядер:

$$t \ll \frac{2\pi}{\gamma H_o},$$

то намагниченность ядер не успевает повернуться и отклоняется от направления магнитного поля. Впервые этот эффект был обнаружен Пурселлом и Паундом.

Отклонение намагниченности ядер от направления магнитного поля в проточной жидкости, которая предварительно поляризовалась в сильном магнитном поле, осуществлялось за счет протекания жидкости внутри катушки нутации, через которую пропускали импульс тока. При этом, катушка нутации находится в неоднородных магнитных полях. Затем жидкость поступала в катушку высокочастотного воздействия и на выходе устройства изменялась амплитуда сигнала абсорбции.

Воздействие осциллирующего электромагнитного поля с частотой, равной частоте прецессии ядер в данном неоднородном магнитном поле, отклоняет намагниченность ядер от направления поля  $H_0$  на некоторый угол  $\theta$  (угол нутации), который определяется выражением:

$$\theta = \gamma H_1 \Delta t,$$

где  $H_1$  – напряженность переменного электромагнитного поля, А/м,  $\Delta t$  – время действия поля  $H_1$ , с.

Намагниченность  $M$  ядер в жидкости, вытекающей в катушку высокочастотного воздействия, пропорциональна проекции намагниченности ядер в жидкости, вытекающей из катушки нутации, и зависит от времени движения жидкости между катушками:

$$M = M_{z \text{ вых}} e^{-V_T / qT_1}.$$

Величина  $M$  пропорциональна амплитуде сигнала абсорбции (эмиссии) в катушке высокочастотного воздействия.

При резонансных условиях в катушке нутации происходит поглощение энергии электромагнитного поля, которая приводит к переходу ядерных спинов с нижнего уровня энергии на верхний. Если в катушку высокочастотного воздействия (стоящую после катушки нутации) поступает жидкость, которая

имеет в верхнем состоянии населенность больше, чем в нижнем, то результирующее поглощение будет отрицательно, т.е. система отдает энергии больше, чем получает. При этом происходит изменение сигнала абсорбции по амплитуде и по знаку:

$$A_n = \frac{M_{z\text{ ввх}} - M_n e^{V_n/qT_1}}{M_n e^{-V_n/qT_1}} = - \left( 1 - \frac{M_{z\text{ ввх}}}{M_n} e^{V_n/qT_1} \right),$$

где  $M_n$  – намагниченность ядер, входящих в катушку нутации.

Таким образом, возбуждение в датчике нутации осциллирующего поля, при установке резонансной частоты по максимуму эффекта нутации и подборе амплитуды колебаний на катушке нутации в высокочастотном колебательном контуре появляется отрицательный сигнал абсорбции. Это означает, что при поступлении жидкости в катушку высокочастотного воздействия отрицательно поляризованной жидкости в ней вместо сигнала абсорбции наблюдается сигнал эмиссии, т.е. спиновая система ядер излучает энергию в радиочастотный колебательный контур и наблюдается сигнал эмиссии, который говорит об уменьшении энергетического состояния протонной системы и жидкости в целом. Задачей, на решение которой направлено изучение эффекта двойного ядерного резонанса, является возможность применения данного способа для повышения октанового числа бензина при сохранении его качества, быстродействия, эффективности, экономичности, экологичности и т.д. при воздействии на протонную систему углеводородных жидкостей (бензинов) [84].

## **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2**

1. Рассмотренные теоретические аспекты магнитного воздействия на водородсодержащие жидкие системы, доказывают изменение энергии взаимодействия магнитного момента ядра, за счёт сверхтонкого взаимодействия, со спиновой системой электронов. В зависимости от способа воздействия, т.е. получения сигнала абсорбции в неоднородных

магнитных полях или при сигнале эмиссии с использованием эффекта двойного ядерного резонанса появляется возможность управлять электрофизическим воздействием на протонную систему водородсодержащей жидкости. Это позволяет как увеличивать, так и уменьшать энергетическое состояние углеводородной жидкости и тем самым влиять на физико-химические и эксплуатационные свойства топлива и масла.

2. Электрофизическое воздействие на протонную систему углеводородной жидкости, позволяет осуществлять изменение энергетического состояния топлива, поступающего в камеру сгорания теплового двигателя.

3. Результаты теоретического исследования электрофизического воздействия на углеводородное топливо могут быть применены для создания устройств электрофизического воздействия на топливо, поступающего в камеру сгорания теплового двигателя.

## **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА**

### **3.1. Методика проведения экспериментального исследования электрофизического воздействия на физико-химические свойства углеводородного топлива**

Наиболее полную оценку эксплуатационных свойств топлив и смазочных материалов можно получить непосредственно на полноразмерном двигателе при проведении эксплуатационных испытаний в реальных условиях. Однако эксплуатационные испытания в связи с их длительностью и сложностью не должны быть обязательным этапом проверки всех опытных образцов топлива, эти испытания проводят обычно лишь в случае новых марок топлива. В данной работе исследуются товарные образцы топлива созданные по известным техническим требованиям и поэтому применяются ускоренные методы испытаний на модельных установках, агрегатах, двигателях и разработанных измерительных приборах, т.е. используются квалификационные и стендовые методы испытаний.

Характерные особенности квалификационных методов испытаний – быстрота, надежность и легкая воспроизводимость получаемой информации при сравнительно малых материальных затратах, в частности при небольших количественных потребностях в испытуемом образце.

Набор квалификационных методов совместно с методами определения физико-химических свойств топлива позволяет объективно и всесторонне оценить каждое эксплуатационное свойство.

Стендовые испытания дают наиболее надежную информацию о пригодности исследуемого образца топлива для применения в данном виде техники и при этом сразу оценивают совокупность эксплуатационных свойств испытуемого образца, причем, как правило, в экстремальных условиях и в течение длительного времени.

Отсутствие теории электрофизического воздействия на жидкие системы обуславливает в настоящее время эмпирический подход к вопросам, связанным с влиянием электромагнитных полей на эксплуатационные свойства топлива.

При электрофизическом воздействии происходят, по-видимому, незначительные изменения электрофизических и физико-химических свойств исследуемых жидкостей. Чтобы оценить эти изменения необходимо создавать новые установки и при этом увеличивать чувствительность, точность аппаратуры, и воспроизводимость получаемых результатов, т.к. всякое более точное измерение в науке приводит к открытию новых закономерностей, которые не могли быть замечены при менее детальном рассмотрении.

Результаты электрофизического воздействия во многом определяются правильным выбором метода исследования, определением разумного диапазона и требуемой точности измерения контролируемых величин. В ряде случаев исследуемые свойства веществ определяются не одним, а целым комплексом показателей, каждый из которых зависит от условий определения и конструкции измерительных устройств. В связи с этим совершенствование приборов и методов аналитического контроля качества топлив и смазочных материалов в лабораторных условиях, определение соответствия между данными лабораторных испытаний и свойствами топлива в эксплуатации, разработка и совершенствование оценки эксплуатационных свойств, для определения основных показателей топлива являются условием необходимым для решения поставленной задачи.

В качестве основных показателей измеряемых нами величин при определении влияния электрофизического воздействия на углеводородные и другие жидкости выбраны: диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость, оптическая плотность, испаряемость, противоизносные свойства, давление насыщенных паров, фреттинг-коррозия, нагарообразование и др.

Созданные приборы для измерения относительных изменений диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости исследуемых

жидкостей после электрофизического воздействия обладают повышенной чувствительностью, точностью и достаточно удобны при измерениях.

Также применены адекватные методы, имитирующие в модели (в миниатюре) изучаемые эксплуатационные свойства жидкостей. Эти методы позволяют более широко судить об изменении эксплуатационных свойств исследуемых объектов.

Комплексное изучение физических, электрофизических и эксплуатационных характеристик топлива после электрофизического воздействия, позволит наиболее полно судить о процессах, происходящих в них и правильно выбирать оптимальные режимы воздействия.

Методика исследования разработанного способа влияния электрофизического воздействия в неоднородных магнитных полях на эксплуатационные свойства горюче-смазочных материалов основана на пропускании углеводородной жидкости через установку, в которой создаются неоднородные постоянные магнитные поля. Одновременно на протонную систему жидкости воздействуют высокочастотным электромагнитным полем с частотой равной частоте прецессии протонов водорода в данном неоднородном магнитном поле.

Сущность способа базируется на относительно сильных взаимодействиях сверхтонкой структуры (СТС) ядерных спинов с электронными спинами того же атома, а также на диполь-дипольном взаимодействии электронного спина изолированного парамагнитного иона с ядерным спином соседнего диамагнитного атома, находящегося от него на некотором расстоянии, поглощении энергии магнитного и высокочастотного полей протонной системой жидкости и перехода ее в возбужденное состояние. Т.е. на взаимодействии ядерных спинов основного химического соединения, получившего дополнительную энергию, со спинами электронов парамагнитных центров помещенных в основное соединение.

В экспериментах используют диамагнитные углеводородные жидкости – топливо и смазочное масло, которые в своем составе имеют парамагнитные неуглеводородные соединения (растворённый кислород, сернистые, кислородные, азотистые, смолистые и соединения, содержащие металлы).



Исследуемые жидкие системы (топливо, масло) пропускали через установку ЭФВ по диамагнитному трубопроводу при комнатной температуре.

В первую очередь проводили поисковые исследования влияния ЭФВ на качественные показатели топлива и масла (диэлектрическую проницаемость, магнитную восприимчивость и т.д.) на разработанных и изготовленных приборах, а также на стандартной аппаратуре.

При определении изменений эксплуатационных свойств топлива (противоизносные, нагаро- и лакообразование и т.д.) использовали стандартные общепринятые методики эксперимента. Все применяемые методики позволили получать табличные значения параметров исходных образцов (до ЭФВ) с требуемой точностью.

В настоящее время в технической литературе описано большое количество разнообразных устройств для магнитного воздействия на жидкие системы, которые отличаются конструктивным оформлением, способом получения магнитных полей, напряженностью и производительностью [135, 142]. Устройства для магнитного воздействия должны быть просты в изготовлении, удобны в эксплуатации, обеспечивать высокую эффективность, экономичность и безопасность при работе с жидкими углеводородами.

Условием, которое необходимо выполнять при конструировании устройств, является пересечение движущимся потоком жидкости магнитных силовых линий. Устройство для воздействия на жидкие системы должно обеспечить максимальную величину намагниченности ядер, для чего необходимо увеличивать напряжённость поляризующего магнитного поля, увеличивать объём при увеличении объёма межполюсного пространства магнита. Чтобы при заданном объёме межполюсного пространства и заданном расходе жидкости получить максимальное время пребывания ядер в поляризующим магнитном поле, необходимо

обеспечить равномерное протекание жидкости по сечению поляризующего объёма.

На практике применяются различные типы поляризующих объёмов, которые могут быть представлены в виде стеклянного змеевика или металлической полости, в которой располагаются направляющие для течения жидкости .

Благодаря большой эффективности и экономичности более широкое применение получили конструкции магнитных устройств со знакопеременным магнитным полем. В этих устройствах жидкости подвергаются многократному воздействию магнитных полей.

В данной работе исследуется новый, разработанный способ электрофизического воздействия с получением сигнала абсорбции в неоднородных магнитных полях на топливо и масло и устройство, которое позволяет упростить конструкцию и расширить круг применения ЭФВ с большей эффективностью.

Устройство для электрофизического воздействия состоит из следующих необходимых частей: постоянного магнита для предварительной поляризации жидкости и высокочастотного автодинного генератора. Схема экспериментального устройства изображена на рис. 3.1.

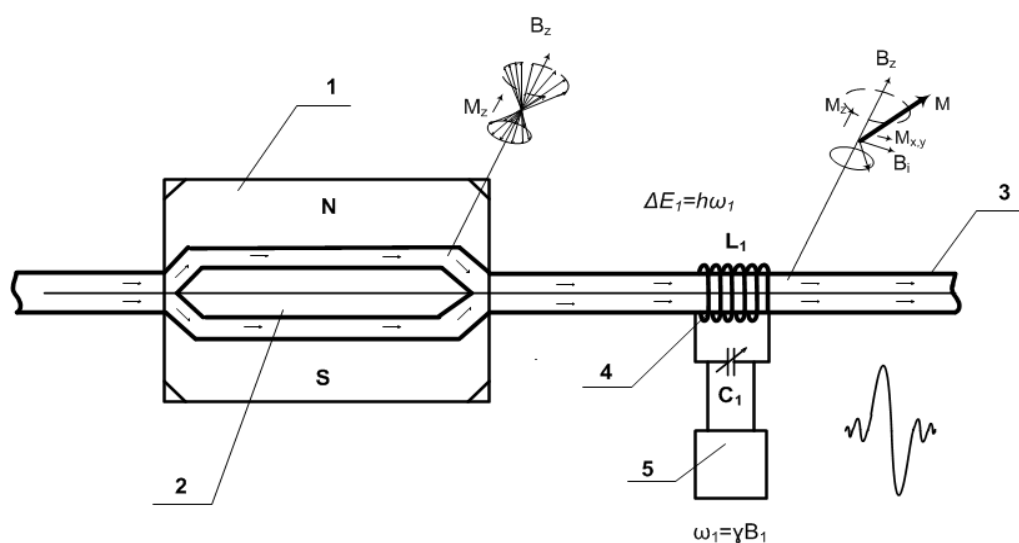


Рис. 3.1. Схема устройства электрофизического воздействия на топливо

Жидкость, приводимая в движение насосом, поступает в камеру поляризатора (2), помещенную между полюсами знакопеременного постоянного магнита (1) с неоднородной напряженностью магнитного поля и находится там некоторое время  $t > 3T_1$ . Из поляризатора по трубопроводу малого сечения (3) жидкость попадает в катушку колебательного контура (4) высокочастотного генератора (5). Эта катушка находится в неоднородном магнитном поле постоянного магнита (1). При наложении на жидкость двух полей: неоднородного постоянного магнитного поля  $H_0$  магнита (1) и переменного электромагнитного поля  $H_1$  катушки (4), происходит электрофизическое воздействие, при котором поглощается энергия переменного электромагнитного поля колебательного контура генератора (5) ядрами водорода основного химического соединения, т.е. углеводородной жидкостью.

Поляризующий магнит (1) обеспечивает наибольшую величину намагниченности ядер в вытекающей из него жидкости и создает неоднородное магнитное поле в зоне катушки (4), в которой происходит резонансное поглощение энергии протонной системой жидкости при электрофизическом воздействии.

Электронная часть установки содержит высокочастотную катушку индуктивности (4), которая является частью колебательного контура автодинного генератора (5). Эта катушка намотана на диамагнитный трубопровод (3), по которому протекает жидкость. Высокочастотная катушка включена параллельно с переменной емкостью и при настройке частоты колебательного контура на частоту прецессии ядер водорода в данном магнитном поле, происходит резонансное поглощение энергии генератора, что вызывает изменение добротности  $Q$  катушки (4).

При поглощении энергии электромагнитного поля катушки индуктивности ядерными спинами снижается добротность  $Q$  катушки и относительное изменение напряжения на контуре равно

$$\frac{\Delta U}{U} = -4\pi Q \chi'' \kappa.$$

Снижение добротности колебательного контура возможно контролировать на стенде с помощью дополнительной электронной аппаратуры и также использовать её для настройки устройства электрофизического воздействия на оптимальный режим работы. Внешний вид устройства представлен на рис. 3.2.

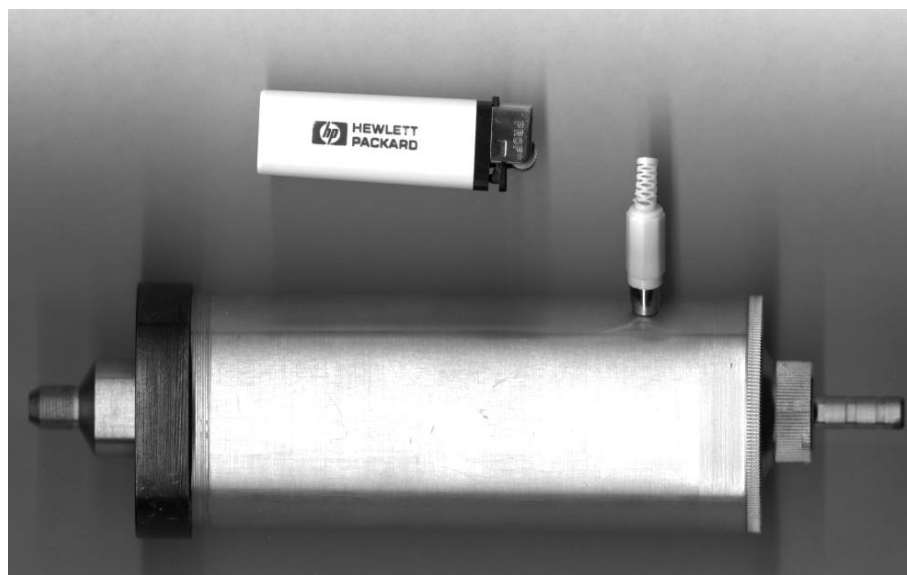


Рис. 3.2. Устройства электрофизического воздействия

На установке проводилось исследование зависимости амплитуды сигнала абсорбции от скорости движения жидкости при  $\gamma^2 H_1^2 T_2 T_1 \gg 1$ . Время нахождения жидкости в поляризующем поле достаточно для полной поляризации протонов при времени релаксации в условиях эксперимента 3...5 с. Градиент внешнего поля в объеме высокочастотной катушки был направлен перпендикулярно движению жидкости.

На рис. 3.3 приведена экспериментальная зависимость амплитуды сигнала абсорбции от величины переменного электромагнитного поля  $H_1$ . Видно, что при небольших значениях  $H_1$  амплитуда сигнала линейно зависит от величины высокочастотного электромагнитного поля. При дальнейшем увеличении  $H_1$

наблюдается максимум амплитуды сигнала абсорбции, которое говорит о качественной зависимости отношения  $A/A_{max}$ .

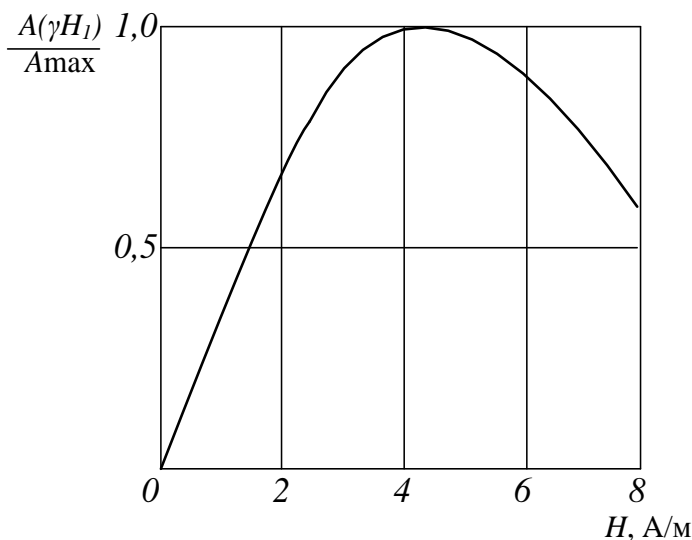


Рис. 3.3. Зависимость амплитуды сигнала абсорбции от переменного электромагнитного поля

Экспериментальная зависимость амплитуды сигнала абсорбции от расхода жидкости при постоянном значении поля  $H_1$  приведена на рис.3.4.

Для экспериментального исследования электрофизического воздействия с эффектом двойного ядерного резонанса была использована проточная установка с двумя датчиками, блок-схема которого приведена на рис. 3.5 .

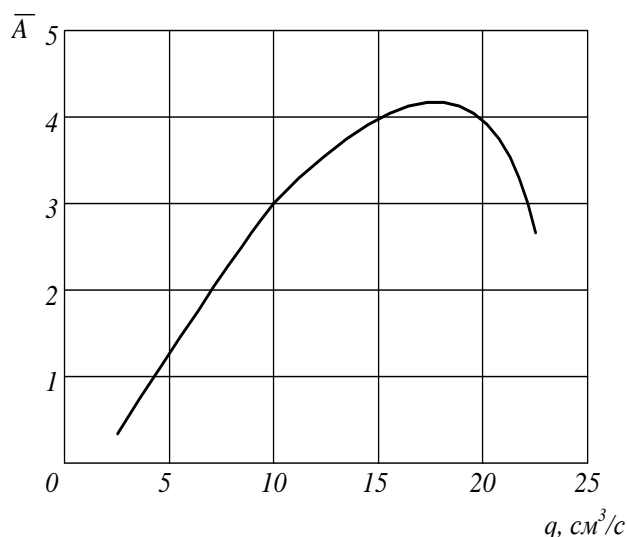


Рис. 3.4. Зависимость амплитуды сигнала абсорбции от расхода жидкости

С целью получения двойного ядерного резонанса после поляризующего магнита и высокочастотной катушки сигнала абсорбции помещена дополнительная радиочастотная катушка нутации (6), которая подключена к генератору синусоидальных колебаний (7) (рис. 3.5).

Катушка нутации помещают в неоднородное магнитное поле и ориентируют так, что жидкость течёт вдоль градиента, а силовые линии осциллирующего поля направлены перпендикулярно внешнему магнитному полю.

Частоту и напряжённость осциллирующего поля подбирают для получения первого экстремума нутации.

Жидкость протекает последовательно через сильное магнитное поле  $H_n$  поляризующего магнита (1), катушку сигнала абсорбции (4), расположенную в магнитных полях рассеивания магнита (1). Затем жидкость попадает в катушку нутации (6) электрофизического воздействия, причем время протекания жидкости от магнита (1) до катушки (6) меньше, чем время спин-решеточной релаксации протонов.

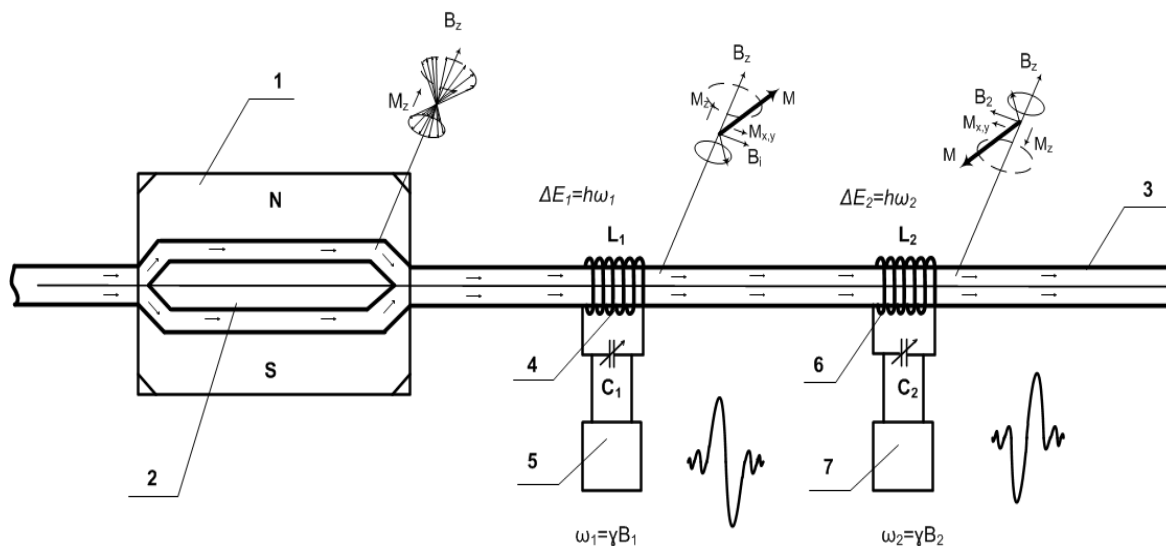


Рис. 3.5. Схема устройства электрофизического воздействия двойного ядерного магнитного резонанса

При протекании жидкости через катушку нутации (6), соединенную с генератором синусоидальных колебаний (7), на ядра действует переменное поле, которое отклоняет вектор ядерной намагниченности на выходе катушки от направления внешнего магнитного поля на угол  $\theta$ . При движении жидкости между катушкой нутации и катушкой высокочастотного воздействия поперечная компонента вектора ядерной намагниченности, подвергнутой воздействию линии спектра  $M_1 = M_{\text{вх}} \sin \theta$  быстро исчезает из-за неоднородностей магнитного поля на отрезке между катушками (4) и (6). Интенсивность сигнала в катушке (6) определяется лишь продольной компонентой  $M_z = M_{\text{вх}} \cos \theta$ . Отсюда видно, что изменение величины намагниченности ядер в катушке нутации (6) приводит к изменению амплитуды и знака сигнала на выходе устройства.

### **3.2. Экспериментальные установки для исследования электрофизического воздействия на физико-химические свойства углеводородного топлива**

Экспериментальные исследования, целью которых было получение экспериментальных данных о влиянии электрофизического воздействия на физико-химические свойства топлив, проводились на сертифицированных экспериментальных установках.

#### **3.2.1. Установка для измерения диэлектрической проницаемости топлива и смазочного масла**

Одним из важных физических параметров веществ является диэлектрическая проницаемость, которая связана с разного рода молекулярными превращениями, происходящими в жидкой системе. В этом смысле диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  значительно превосходит по своей чувствительности такие широко применяющиеся в физико-химическом анализе свойства, как плотность, вязкость, показатель преломления и другие.

Связь между диэлектрической проницаемостью и структурой вещества является установленной и поэтому измерение  $\varepsilon$  с большой точностью после возможных воздействий на вещество, физических или химических, позволяет яснее понять процессы, происходящие в исследуемом объекте.

Одним из методов определения диэлектрической проницаемости жидких сред является метод измерения электроёмкости конденсатора.

Существует много методов измерения электроёмкости, однако мостовой метод является наиболее распространенным, простым, надежным и достаточно точным. Для измерения ёмкости используются различные мостовые схемы [46]. Наибольшей устойчивостью против влияния внешних условий при эксплуатации прибора обладают трансформаторные мосты с тесной индуктивной связью между плечевыми элементами [24].

Эффективность применения трансформаторных мостов для измерения неэлектрических величин вытекает из возможности применения в качестве измерительного преобразователя трехэлектродного конденсатора. Основным преимуществом трехэлектродного конденсатора является то, что его прямая ёмкость зависит только от диэлектрических свойств среды, находящейся между измерительными электродами и не зависит от других частичных ёмкостей и ёмкости соединительного кабеля. Диэлектрические потери  $tg\delta$  в прямой ёмкости определяются лишь потерями в контролируемом диэлектрике. Основным элементом установки является измерительный преобразователь (рис.3.6.), представляющий собой трехэлектродный цилиндрический коаксиальный конденсатор, ёмкость которого определяется из выражения:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 h}{\ln \frac{D_2}{D_1}}$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $D_1, D_2$  – диаметры внутреннего и внешнего цилиндрических электродов;  $h$  – высота электродов. Установка



трехэлектродного емкостного преобразователя состоит: 1 – высокопотенциальный рабочий электрод, 2 – низкопотенциальный электрод, 3 – изоляционные шайбы, 4 – корпус преобразователя, 5 – уплотнительные прокладки.

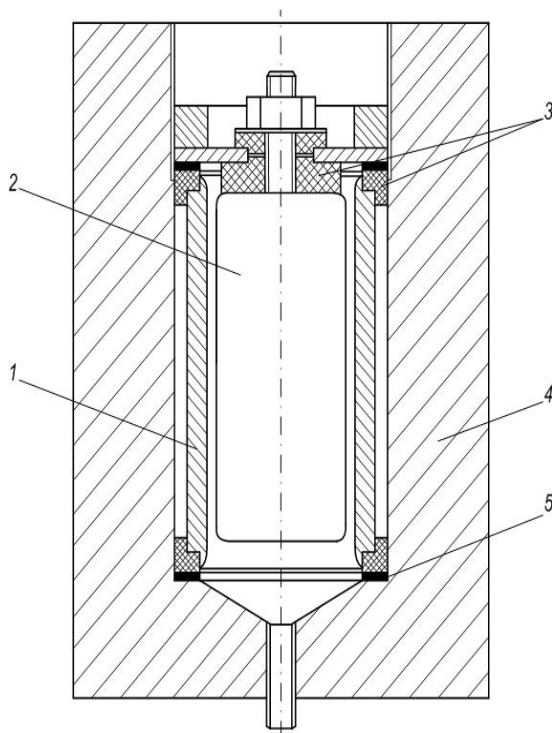


Рис. 3.6. Конструкция трёхэлектродного ёмкостного преобразователя

При исследовании диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь применён усовершенствованный электронный измеритель ёмкости Р-5083, в котором питающее напряжение емкостного преобразователя понизили до 50 мВ.

Калибровку прибора производили по индивидуальным углеводородам с известной диэлектрической проницаемостью при  $T=293\text{ К}$  [103].

### **3.2.2. Установка для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ**

Явление диамагнетизма как одно из самых универсальных в природе, обнаруживает диамагнитные свойства и лишь в незначительном числе случаев диамагнетизм, подавляющего большинства веществ как органических,

так и неорганических, перекрывается парамагнетизмом или ферромагнетизмом [29, 30].

Описано довольно подробно большое количество методов для прецизионного измерения магнитной восприимчивости [124].

Для измерения изменений магнитной восприимчивости топлива применен высокочастотный метод. Целесообразность применения этого метода обусловлена высокой чувствительностью автогенераторных приборов, простотой схемных решений, отсутствием дорогостоящих магнитов с заданным значением  $H \frac{dH}{dz}$ , относительная быстрота проведения эксперимента.

Основным элементом автогенераторной схемы является последовательный колебательный контур, который состоит из индуктивного измерительного преобразователя и подстроечного конденсатора.

Индуктивность измерительного преобразователя, расположенного в среде с магнитной проницаемостью  $\mu$ , связана с индуктивностью этого же преобразователя в вакууме  $L_0$  выражением:

$$L = \mu L_0 = (1 + 4\pi\chi) \cdot L_0$$

Если же материал с магнитной восприимчивостью  $\chi$  вносится в катушку, то формула принимает вид:

$$L' = (1 + 4\pi\chi k) \cdot L_0 \quad 3.1$$

где  $k$  – фактор заполнения, который зависит от формы и количества вводимого в катушку вещества и всегда  $k \leq 1$ .

Выражение (3.1) может быть приведено к виду:

$$\frac{L' - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = 4\pi\chi k . \quad 3.2$$

Так как частота колебательной системы зависит от параметров этого контура  $L$  и  $C$ :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

а индуктивность измерительного преобразователя в свою очередь связана с магнитной восприимчивостью среды (3.1), то можно записать:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(1+4\pi\chi k)C_0}}.$$

Непосредственно измерение индуктивности преобразователя для нахождения  $f$  на практике не проводят, но на основе формулы (3.2) могут быть получены выражения для расчета  $\chi$  в любом частном случае.

Поле измерительного преобразователя принимают квазистационарным, так как размеры преобразователя обычно значительно меньше длины волны в воздухе, а потери на излучение малы. Исходным уравнением для определения поля измерительного преобразователя и величины, характеризующих взаимодействие между полем и веществом, являются уравнения Максвелла.

Измерительный преобразователь представляет собой катушку индуктивности (рис.3.7), которая намотана на радиокерамическом каркасе  $\varnothing=30$  мм (4) медным посеребренным проводом для увеличения добротности катушки. Измеренная добротность преобразователя равна  $Q=450$ . Внутри преобразователя располагается сосуд (5) из кварцевого стекла для исследуемого топлива, так что на топливо воздействует внутреннее электромагнитное поле катушки. Условия симметрии для внутренней части катушки лучше вследствие меньшей величины нескомпенсированного электромагнитного поля, которое приводит к уменьшению чувствительности. Кроме того, благодаря применению заземленного экрана, влияние нескомпенсированного электрического поля сильно понижено, поэтому почти полностью устранен емкостный эффект.

При измерении магнитной восприимчивости диамагнитных веществ очень жесткие условия накладываются на стабильность частоты генератора – относительное изменение, которой не должно превышать  $1 \cdot 10^{-8}$ . Важнейшими факторами, влияющими на стабильность частоты, являются

изменения питающего напряжения и колебания температуры окружающей среды.

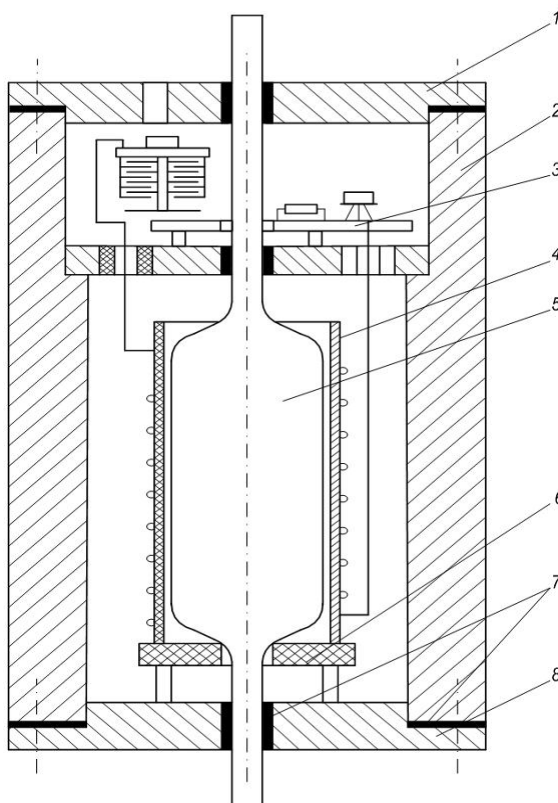


Рис. 3.7. Установка для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных жидкостей

Схема установки для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ представлена на рис. 3.8.

При измерении относительным методом для подсчета удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  исследуемого вещества плотности  $d$  использована формула:

$$\chi = \frac{N - N_n}{N_{эм} - N_n} \cdot \frac{d_{эм}}{d} \cdot \chi_{эм} + \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_k} \right),$$

где  $N_n, N, N_{эм}$  – разности показаний частотомера, соответственно с пустой ампулой, ампулой с исследуемым образцом и ампулой с эталоном;  $\chi_{эм}$  – удельная восприимчивость эталона.

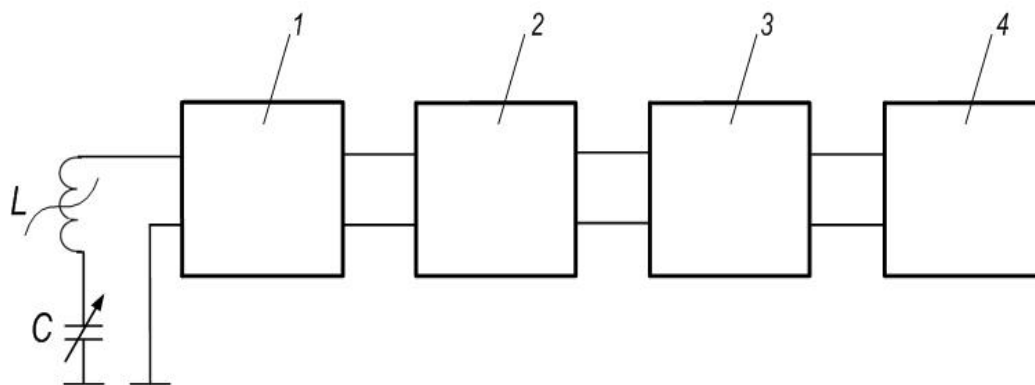


Рис. 3.8. Схема прибора для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ: 1- высокочастотный генератор; 2 – широкополосный усилитель; 3 – выходной каскад; 4 – цифровой частотомер

Для измерения  $\chi^d$  жидкостей формула упрощается и принимает вид:

$$\chi = \frac{N - N_n}{N_{эм} - N_n} \cdot \frac{d_{эм}}{d} \cdot \chi_{эм}.$$

Таким образом, для получения искомой величины магнитной восприимчивости на данном приборе необходимо проведение трех измерений с целью нахождения  $N, N_n, N_{эм}$ . Относительная погрешность измерения частоты составляет  $\varepsilon_f = 5 \cdot 10^{-5} \%$ .

### 3.2.3. Спектральные исследования

Тесная взаимосвязь индивидуальных свойств молекул, свойств вещества в целом, нестационарность межмолекулярных взаимодействий в первую очередь сказываются на спектральных проявлениях вращательного движения молекул. Обычно это приводит к изменению или определенному усложнению контуров полос. Система изучения факторов, влияющих на форму полос спектров, дает ценную информацию о динамике движения молекул в жидкости и ее структуре. Не менее ценные сведения о межмолекулярном взаимодействии

можно получить из изменения частот и интенсивностей поглощения в зависимости от состояния вещества и температуры.

Для этой цели были проведены исследования на промышленных приборах как отечественного, так и зарубежного производства.

При изучении колебательно-вращательных спектров в ближней инфракрасной области спектроскопии (ИКС) от 400 до 4000 см<sup>-1</sup> был использован двухлучевой инфракрасный спектрофотометр типа UR-20 фирмы "Carl Zeiss Jena" Германия. Спектры снимали в тонком слое жидкости между окнами герметичной кюветы от прибора UR-20 с толщиной – 0,15мм при следующих параметрах: щелевая программа – 4, скорость развертки спектра 150 см<sup>-1</sup>/см, масштаб регистрации – 12 мм/100 см<sup>-1</sup>, время полного пробега пера – 10 с.

Измерение коэффициента светопропускания или оптической плотности исследуемых веществ в видимой области спектра использовали фотоэлектрический колориметр – нефелометр ФЭК-56М. При помощи фотоэлектрического колориметра – нефелометра типа ФЭК-56М исследовали кинетику образования смол косвенным методом по коэффициенту светопропускания:

$$\tau = \frac{F \cdot 100}{F_0} \%,$$

где  $F_0$  – полный световой поток;  $F$  – поток, пропущенный через исследуемую среду.

Определение коэффициента светопропускания проводили по отношению к дистиллированной воде. Из соображений максимальной светопоглощающей способности, работу вели при длинах волн  $364 \pm 5$  нм и  $400 \pm 5$  нм, при которых получена наиболее высокая чувствительность к происходящим в топливе изменениям и толщине рабочего слоя жидкости 50 мм.

Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) снимали на установке РЭ-1301. Определение образования парамагнитных центров

проводили по известной методике с использованием в качестве стандартного вещества 1.1 – дифенил – 2 – пикрилгидразила.

Излучение основных параметров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) – химического сдвига, констант спин-спиновой и спин-решетчатой связи были проведены на радиоспектрометре BS-477 фирмы "Tesla".

Количественный анализ, установление структуры сложных органических соединений проводился молекулярным масс-спектроскопическим методом (ММС) на приборе типа MX-1303 при поддержании температуры 523К и энергии электронного пучка 50эВ.

Для исследования продуктов износа механизмов, работающих в среде топлива, использовался метод эмиссионной спектроскопии (ЭС) позволяющий определять концентрацию металла в топливе,  $10^{-4}$  % веса.

Наряду со спектральными методами анализа топлива все чаще прибегают к комбинированным методам исследования, в которых хроматография играет важную роль.

Определение содержания кислорода растворенного в топливе проводили методом газожидкостной хроматографии, основанным на выделении из исследуемой жидкости газов ( $O_2$ ,  $N_2$ ) в предварительно откакумированную до 1 мм.рт.ст. полость, заполненную инертным газом.

Анализ содержания растворенного кислорода проводили на хроматографе ЛХМ-72 при следующих условиях: скорость газоносителя (гелия) – 30 мл/мин; температура термостата колонок – 323К; ток детектора – 150мА.; длина колонки – 3м; дозируемый объем– $10\text{см}^3$ ; чувствительность детектора по теплопроводности – 1:1; наполнитель колонки – "Парopak Q " зернением 0,2 – 0,25 мм.

### **3.2.4. Установки и устройства для оценки эксплуатационных свойств топлив и смазочного масела**

Основной задачей лабораторной оценки эксплуатационных свойств топлив и масел является обеспечение рационального применения топлив и

масел в технике. В настоящее время лабораторными методами оценивают целый ряд эксплуатационных свойств топлив и масел для различных двигателей [3, 26, 104]. К ним можно отнести противоизносные свойства, испаряемость, сгорание и нагарообразующую способность, низкотемпературные свойства и ряд других, а также исследования противоизносных свойств материалов в углеводородных средах.

Для оценки противоизносных свойств топлив при трении скольжения была принята величина по среднему диаметру пятен износа трех подшипниковых шариков из стали ШХ15 диаметром 25,4 мм. Диаметр пятен износа определялся с помощью микроскопа МИМ-7.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.3.9. Пара трения, представляющая собой плоский диск 2 и шарики 5, помещена в топливную камеру 7. Диск устанавливается в держателе 1, а шарики – в сепараторе 6, где фиксируются от проворачивания прижимной шайбой 4. Все детали центрируются осью 3, которая крепится к днищу герметичной топливной камеры.

Конструкция установки позволяет в широком диапазоне изменять условия испытания: скорость вращения вала испытательного узла от 166 до 1000 об/мин, температуру топлива от 273 К до 493 К и максимальное контактное напряжение от 50 до 400 кг/мм<sup>2</sup>. Емкость топливной камеры – 100 мл; избыточное давление топлива до 0,5 атм. Экспериментально установлено, что точность метода характеризуется коэффициентом вариации, который находится в пределах 4...5 %.

Для исследования износостойкости материалов в условиях трения скольжения при линейном контакте плоскость по плоскости в топливной среде проводили на установке ПТЛК (прибор трения линейного контакта). Режим работы установки следующий:  $V_{ск} = 0,3$  м/с;  $\sigma_H^{max} = 1000$  МПа;  $S = 1000$  м.

Измерение линейных размеров образцов осуществляли методом профилографирования на профилографе – профилонетре "Калибр М-201",



который позволяет производить измерения с точностью до 0,0001 мм. Погрешность определения износостойкости на установке ПТЛК не превышает 7 %.

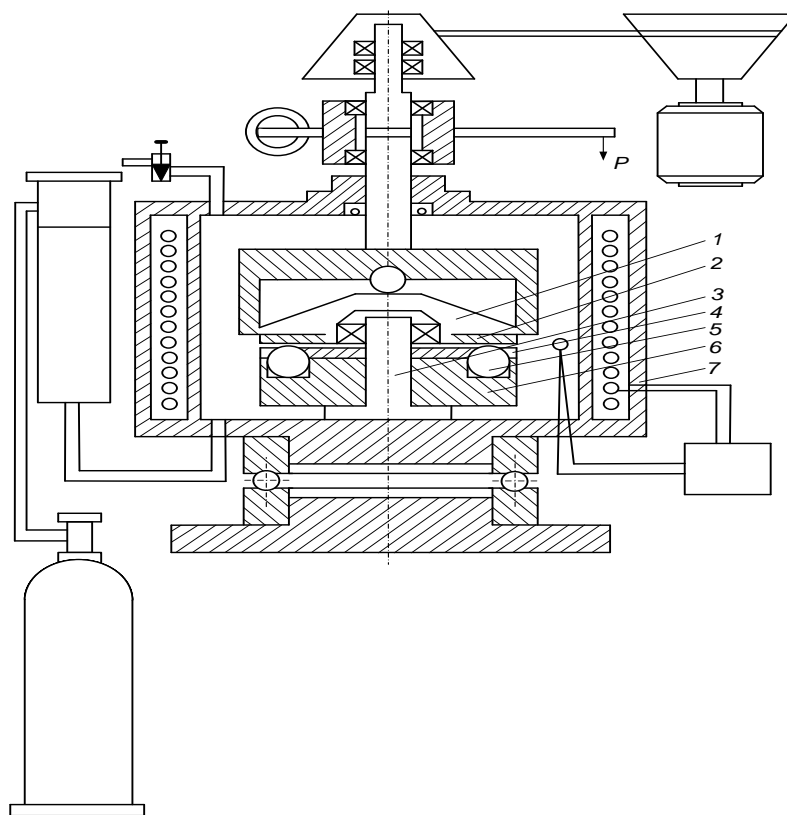


Рис. 3.9. Схема экспериментальной установки для оценки противоизносных свойств топлив

При относительном перемещении металлических поверхностей, которые могут вызываться вибрациями, обратнопоступательным перемещением, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей, может возникнуть фреттинг-коррозия.

При фреттинг-коррозии значительно ухудшается качество поверхностей деталей, увеличивается интенсивность износа контактирующих поверхностей и детали часто теряют конструктивные размеры и допуски, а это приводит к существенному снижению их усталостной прочности.

Явление фреттинг-коррозии в условиях кольцевого контакта образцов при их тангенсальном относительном смещении исследовали на установке МФК-1. В установке трение контактирующих образцов, выполненных в виде

штуки и цилиндра происходит в среде масла МС-8п. Площадь контакта при этом равна  $0,5 \text{ см}^2$ ; испытания возможно проводить при амплитуде скольжения  $0,001 \dots 2,5 \text{ мм}$ ; частоте колебаний –  $10 \dots 400 \text{ Гц}$ ; удельной нагрузке до  $2000 \text{ кг/см}^2$ .

Температуру опыта измеряли ртутным термометром с ценой деления  $0,1 \text{ К}$ , неравномерность температурного поля по длине рабочего участка сосуда не превышала  $0,5 \text{ К}$ . Рабочий объем прибора составлял около  $150 \text{ см}^3$ .

Определение полноты сгорания и нагарообразования топлива проводили на стендовой установке, а именно на малоразмерной камере сгорания.

Полнота сгорания и склонность топлива к нагарообразованию является основными эксплуатационными характеристиками, которые имеют большое практическое значение при повышении ресурса двигателей. Определение данных характеристик топлива проводили на стенде с малоразмерной камерой сгорания, выполненной по типу сгорания турбореактивного двигателя ВК-1, жаровая труба малоразмерной камеры изготовлена разборной.

Перед оценкой топлива на склонность к нагарообразованию среднюю часть жаровой трубы малоразмерной камеры сгорания очищают от нагара и взвешивают с точностью до  $0,01 \text{ кг}$ , после чего камеру собирают и монтируют на стенде.

Все испытания проводят при строго постоянных условиях: расход воздуха, поступающего в камеру сгорания –  $0,25 \text{ кг/с}$ ; давление воздуха перед камерой сгорания –  $0,25 \text{ кг/см}$ ; температура воздуха перед камерой сгорания –  $333 \text{ К}$ ; состав рабочей смеси – коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 4$ . Испытания на постоянном режиме проводили в течение 1 часа.

Количество нагара, отложившегося в жаровой трубе за 1 час сгорания испытуемого топлива определяли по разности веса средней части жаровой трубы до и после испытания.

При снятии характеристик по полноте сгорания выдерживают те же постоянные условия. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha=4$  устанавливают

изменением расхода топлива. На установленном режиме работают не менее 4 мин.

Коэффициент полноты сгорания  $\eta$  топлива определяют по тепловому балансу и газовому анализу предлагаемой методики.

Исследование склонности моторного масла к нагаро- и лакоотложениям проводили на одноцилиндровой установке Petter W-1. Испытания проводили в течение 36 часов с момента выхода на режим.

В качестве основных оценочных показателей в методике Petter W-1 принимаются отложения на головке поршня, на юбке поршня, оцененные по цветной 10-ти бальной шкале. Состояние внутренней стороны головки поршня, отложения на маслосборном кольце оценивается по методике AV-1.

Условия испытания на установке Petter W-1 были следующие: обороты –  $1500 \pm 10$  об/мин; нагрузка –  $2,2 \text{ кг/см}^2$ ; расход топлива – 20 мл за  $55 \pm 0,5$  с; температура охлаждающей жидкости на входе –  $146 \pm 4^\circ\text{C}$ , на выходе –  $150 \pm 1^\circ\text{C}$ ; температура масла –  $137,5 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Детонационная стойкость бензинов исследовалась на универсальной четырехтактной бензиновой установке УИТ-85, предназначенной для определения октановых чисел бензинов по моторному и исследовательскому методам.

Для определения цетановых чисел дизельных топлив, характеризующих самовоспламеняемость в дизелях, использовали установку ИДТ-90, являющуюся одноцилиндровым четырехтактным двигателем с воспламенением от сжатия и вихревой камерой сгорания.

Исследование способности топлива к окислению при повышенной температуре с образованием смол проводили методом определения фактических смол (по Бударову).

Метод заключается в выпаривании испытуемого топлива в условиях испытания. Концентрация фактических смол  $\chi$  в миллиграммах на  $100 \text{ см}^3$  топлива в каждом стакане вычисляется по формуле:

$$\chi = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100}{V},$$

где  $m_1$  – масса чистого сухого стакана, мг;  $m_2$  – масса стакана со смолами, мг;  $V$  – объем топлива, налитого в стакан для испытания, см<sup>3</sup>.

За результат испытания принимали среднее арифметическое значение двух определений.

Метод определения кислотности дизельного топлива заключался в титровании испытуемого топлива раствором едкого кали до изменения окраски раствора [79].

Кислотность, выраженную в мг КОН на 100 мл топлива вычисляют по формуле:

$$\chi = \frac{(V_2 - V_3) \cdot T \cdot 100}{V_4},$$

где  $V_2$  – объем 0,05 Н спиртового раствора кали, израсходованный на титрование топлива, в мл;  $V_3$  – объем 0,05 Н спиртового раствора едкого кали, израсходованный на титрование растворителя, в мл;  $V_4$  – объем топлива, взятый для испытания, в мл;  $T$  – титр 0,05 Н спиртового раствора едкого кали в мг КОН на 1 мл.

Кислотность топлива вычисляли как среднее арифметическое из результатов двух параллельных определений.

С целью получения информации о топливной экономичности ДВС, при электрофизическом воздействии на дизельное топливо, использовали метод стендовых испытаний дизелей.

Изменение эффективных, экономических и экологических показателей дизеля фирмы "Mercedes-Benz" и КамАЗ-740 определяли по нагрузочной характеристике при серийной системе питания и регулировке двигателя согласно инструкции по эксплуатации.

Исследовали зависимости ряда характерных показателей работы дизелей (эффективной мощности  $N_e$  крутящего момента  $M_k$ , часового  $G_T$  и удельного

$g_e$  расходов топлива) от частоты вращения  $n$  коленчатого вала двигателя:

$$N_e, M_k, G_T, g_e = f(n).$$

Двигатели испытывали на стенде СТЭУ–55 разработанным ГосНИТИ с тормозной установкой позволяющей поглощать развиваемую двигателем механическую энергию. Одновременно, для непрерывного измерения концентрации токсичных компонентов в отработавших газах, использовали стационарную систему АСГА–Т, которая позволяет непрерывно измерять содержание оксидов углерода ( $CO$  и  $CO_2$ ) углеводородов  $C_mH_n$  и оксидов азота  $NO_x$  в отработавших газах дизеля.

Токсичность отработавших газов карбюраторного двигателя определяли на ДВС автомобиля ГАЗ-66-11.

Температуру охлаждающей жидкости, масла в поддоне и топлива поддерживали постоянной в соответствии с указаниями ДСТУ.

### **3.3. Влияние постоянного магнитного поля на углеводородного топлива**

С момента производства на заводе и до сгорания в двигателе на топливо воздействует ряд факторов, которые вызывают изменение эксплуатационных свойств. Степень изменения качества топлив под действием этих факторов различна в зависимости от их состава.

При длительном хранении бензинов и дизельных топлив в результате окисления образуются смолы, которые наряду с кислородом содержат серу и азот. Первичные гетероорганические примеси, содержащиеся в топливе, активно участвуют в смолообразовании превращаясь под действием кислорода и излучения в смолистые вещества.

В зависимости от химического состава и структурных особенностей углеводородных соединений, входящих в состав топлив и масел, магнитная восприимчивость нефтепродуктов будет различна.

Углеводородный состав топлив и масел обладает диамагнитными свойствами, а свободные радикалы, растворенный в топливе кислород и кислородсодержащие элементы обладают ярко выраженными парамагнитными свойствами [103]. Вследствие этого при помещении топлив и масел в неоднородное магнитное поле на их компоненты будут действовать пондеромоторные силы:

$$F = m\chi H \frac{dH}{dz},$$

где  $m$  – масса образца;  $\chi$  – магнитная восприимчивость компоненты;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $dH/dz$  – градиент магнитного поля в направлении оси  $z$ .

Эти силы для компонентов топлива с различной магнитной восприимчивостью будут отличаться по величине и направлению действия, что в свою очередь должно влиять на скорость и глубину окислительных превращений углеводородов [14, 15, 95] в процессах транспортирования и хранения.

Исследование влияния постоянного магнитного поля на химический состав, физические и физико-химические свойства топлив проводили в статическом режиме воздействия в течение 21 суток при напряженности магнитного поля 40 кА/м. Для исключения побочных явлений в контрольных опытах определяли влияние естественного рассеянного дневного излучения при свободном доступе воздуха к углеводородным жидкостям и в герметически закрытых сосудах. Определяли характер влияния совместного действия магнитного поля и естественного дневного излучения. Через каждые 72 часа жидкости извлекали из поля постоянного магнита для измерения контролируемых величин. Никакой предварительной подготовки образцов топлив перед экспериментами не проводили. Измерения проводили при температуре окружающей среды –  $293 \pm 1$  К [76].

### 3.3.1. Окисляемость углеводородного топлива

При транспортировке, хранении и эксплуатации углеводородные жидкости растворяют до 25% воздуха благодаря процессу диффузии или при перемешивании. Растворимость газов воздуха подчиняется закону Генри [96] и зависит от химического состава растворителя, парциального давления газов и температуры окружающей среды. В поверхностном слое топлива растворяется значительно больше газов, в том числе и кислорода, чем в аналогичных по толщине слоях, расположенных в остальном объеме топлива. При нормальных условиях в топливах содержание кислорода на 60-70%, выше, чем азота [123]. Интенсивное перемешивание топлива в условиях доступа воздуха приводит к увеличению содержания кислорода в нем. Это в свою очередь сказывается на ускорении процессов окисления и накоплении растворимых и твердых смолистых соединений.

Влияние магнитного поля на окисляемость топлива ТС-1 оценивали по коэффициенту светопропускания, определяемого прибором типа ФЭК-56М. С увеличением в топливе смол и продуктов уплотнения коэффициент светопропускания уменьшается.

Как видно из данных рис.3.10 магнитное воздействие на топливо в герметически закрытых емкостях, содержащего только растворенный кислород, приводит к незначительному уменьшению коэффициента светопропускания. Это позволило сделать предположение, что в этих условиях окисление топлива идет с незначительной скоростью. При совместном влиянии естественного дневного излучения и магнитного поля коэффициент светопропускания изменяется больше.

К концу 21 суток он понижается на 1...1,5 %. При дневном излучении скорость понижения коэффициента светопропускания примерно в два раза выше, по сравнению с описанными результатами. Уже через 10 дней, наблюдается пожелтение, а через месяц из топлива выделяются нерастворимые смолистые соединения. Оптическая плотность топлива при его хранении

на свету возрастает неравномерно, по-видимому, вследствие одновременного образования и выпадения из раствора смолистых соединений.

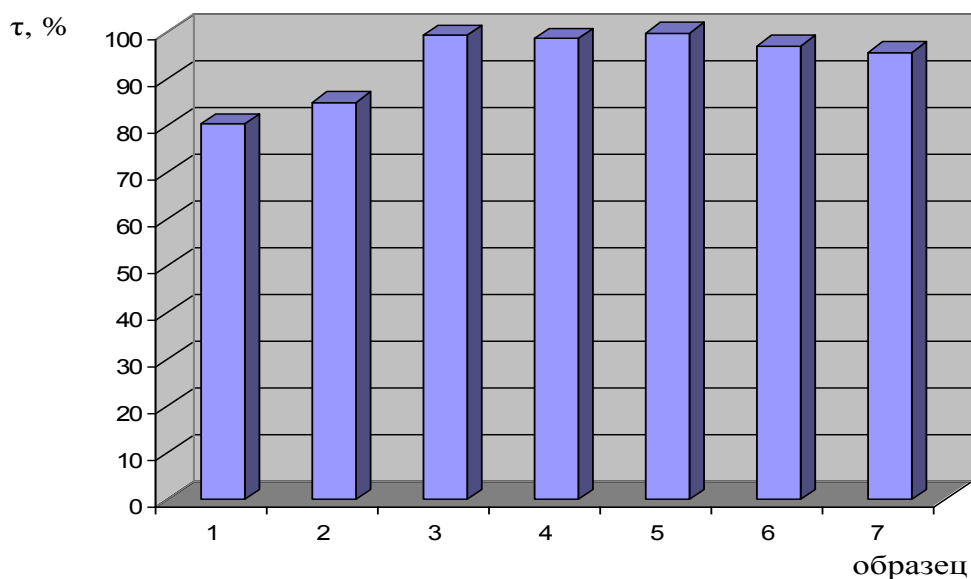


Рис. 3.10. Изменение коэффициента светопропускания при различных способах хранения

При свободном доступе воздуха наибольшая скорость изменения коэффициента светопропускания, а значит и скорость накопления продуктов окисления, наблюдается при облучении топлива рассеянным дневным светом. Через 3 суток облучения коэффициент светопропускания понизился примерно на 5 %, а к концу поставленных исследований (21 день) он понизился более чем на 20 %. Влияние магнитного поля в этих условиях выразилось в уменьшении скорости понижения коэффициента светопропускания. С увеличением времени эффективность такого воздействия несколько повышается. Так, например, коэффициент светопропускания для образца облучаемого дневным светом в магнитном поле при свободном доступе воздуха в течение 6 суток ниже на 2,5 %, а через 21 сутки - примерно на 5 %.

Более низкая скорость изменения коэффициента светопропускания отмечается при свободном доступе воздуха к поверхности топлива при



отсутствии дневного излучения и магнитного поля. Магнитное воздействие на топливо со свободным доступом воздуха сказывается на некотором (до 1,5 %) понижении коэффициента светопропускания.

Таким образом, окисление товарного топлива в магнитном поле при статическом режиме воздействия, свободном доступе воздуха к поверхности жидкости и облучении рассеянным дневным светом происходит со значительно меньшей глубиной и скоростью. Это очевидно, связано с образованием продуктов окисления углеводородов, которые, распределялись по всему объему топлива, образуют небольшие ассоциаты, тормозящие дальнейший процесс окисления. Ускорение же процесса автоокисления световой энергией объясняется за счет повышения энергии электронов, получения кванта энергии, и перехода их на более высокий энергетический уровень или отрыва от нейтральной молекулы. Реакция фотоокисления является триплет-триплетной аннигиляцией, возникающей вследствие обменно-резонансного взаимодействия, а эта аннигиляция является магнито-чувствительной.

### **3.3.2. Диэлектрическая проницаемость углеводородного топлива**

Весьма эффективным методом контроля физико-химических свойств можно осуществлять по изменению электрических характеристик углеводородных жидкостей, а именно, по изменению диэлектрической проницаемости вещества. Диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  топлива ТС-1 измеряли на изготовленной установке повышенной чувствительности, которая описана в третьей главе. Результаты экспериментальных данных определения диэлектрической проницаемости представлены на рис.3.11.

Для исследованных образцов товарного топлива величина  $\epsilon$ , определяемая при нормальных условиях ( $T = 293 \text{ K}$ ), после 21 суток воздействия постоянного магнитного поля изменяется от 2,0740 до 2,0871, т.е. отличается на 0,63 % от исходного значения. Наиболее существенные изменения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 2,0871$ ) происходят при воздействии на

топливо рассеянного дневного излучения и при свободном доступе кислорода воздуха. Воздействие магнитного поля в тех же условиях приводит к уменьшению скорости изменения ( $\varepsilon = 2,0840$ ). Из графика видно, что при дальнейшем продолжении воздействий различных факторов, разница между этими образцами топлива будет увеличиваться.

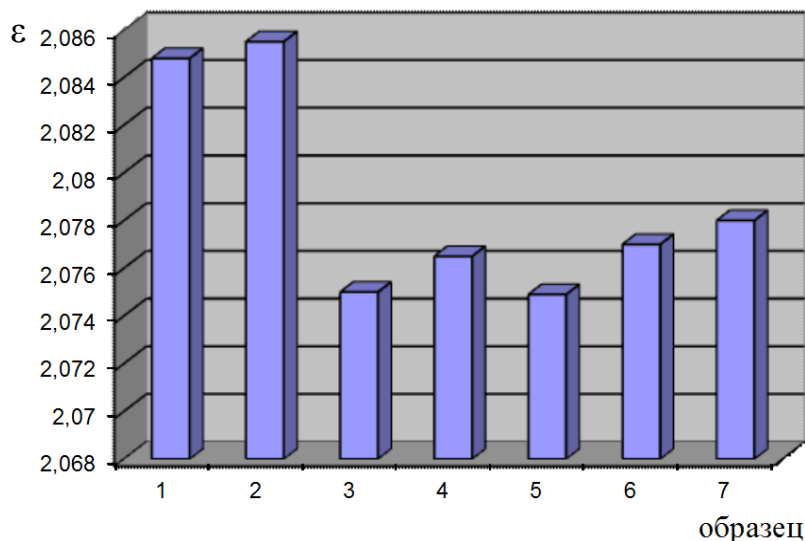


Рис. 3.11. Изменение диэлектрической проницаемости топлива при различных способах хранения

Если же на топливо воздействует только рассеянное дневное излучение или имеется свободный доступ воздуха к поверхности топлива, то скорость увеличения диэлектрической проницаемости значительно падает и ее значения на 21 сутки становятся равными соответственно 2,0758 и 2,0780. Постоянное магнитное поле приводит к некоторому понижению диэлектрической проницаемости при данных условиях, т.е. при облучении дневным светом –  $\varepsilon = 2,0750$ , а при свободном доступе кислорода воздуха –  $\varepsilon = 2,0769$ . Воздействие же только магнитного поля не приводит к заметным изменениям диэлектрической проницаемости топлива.

Возрастание диэлектрической проницаемости углеводородного топлива можно объяснить повышением концентрации полярных кислородсодержащих молекул, образующихся в результате окисления углеводородов и

гетероорганических соединений, содержащихся в топливе. Можно предположить, что полярные молекулы возникают вследствие образования дипольных связей и групп. Одной из форм ускорения процессов автоокисления является световая энергия, способная в ряде случаев вызывать и ускорять химические процессы при относительно низких температурах. Окисление топлива кислородом воздуха под влиянием рассеянного дневного излучения приводит к получению промежуточных продуктов. Однако, магнитное поле препятствует поступлению кислорода воздуха к поверхности углеводородной жидкости в результате чего количество поглощенного кислорода в товарном топливе значительно уменьшается, т.е. при хранении топлива в магнитном поле происходит насыщение поверхностного слоя жидкости кислородом и парамагнитными радикалами, что в свою очередь препятствует проникновению молекулярного кислорода в глубь образца и тем самым процесс окисления нестабильных углеводородов будет протекать гораздо медленнее, что и влечет за собой уменьшение окисляемости топлив.

В последние годы выяснилась закономерность, которая не учитывалась ранее при постановке экспериментов, а именно зависимость результатов исследований окисления топлива от направления вектора магнитного потока.

Проведены исследования по выяснению влияния ориентации вектора постоянного магнитного поля на окислительные процессы происходящих в топливе. С этой целью, контроль проводили по величине изменения диэлектрической проницаемости.

Исследуемые образцы топлива располагали в полях постоянных магнитов с противоположно направленными векторами магнитного потока.

В результате многочисленных опытов было установлено, что при направлении магнитных силовых линий к поверхности раздела фаз жидкость-воздух изменения диэлектрической проницаемости составили 0,39% ( $\epsilon = 2,0821$ ; исходный образец –  $\epsilon = 2,0740$ ). В образцах топлива, где

направление магнитных силовых линий было противоположным диэлектрическая проницаемость изменилась на 0,48% ( $\epsilon = 2,0840$ ) (рис. 3.12).

Влияние ориентации вектора магнитного поля на кинетику процессов окисления, можно объяснить различным количеством парамагнитных молекул перемещающихся вдоль и против магнитного поля, т.к. по силовой линии поля движется больше парамагнитных частиц, чем в противоположном направлении.

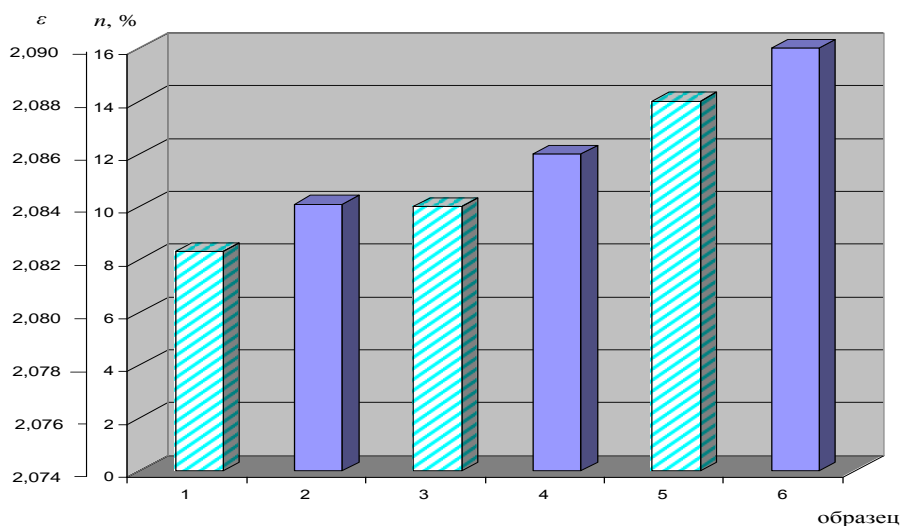


Рис. 3.12. Влияние ориентации вектора магнитного поля на процессы окисления

Результаты исследований диэлектрической проницаемости хорошо коррелируются с данными при измерении оптической плотности, что подтверждает увеличение концентрации продуктов окисления в топливах и влияние магнитного поля на окислительные процессы. Причем для различных условий эксперимента это влияние различно, что связано с различием магнитных свойств углеводородов и кислорода. Также известно, что механизм окисления различных групп углеводородов неодинаков. Практически углеводороды различных групп окисляются не порознь, а в смеси друг с другом, причем одни из них инициируют, другие тормозят окисление остальных, т.е. являются ингибиторами. Тормозящее действие оказывают также некоторые образующиеся продукты окисления. Поэтому установить единые и

твердые закономерности окисления таких сложных смесей как углеводородные топлива в магнитных полях – задача очень сложная.

### 3.3.3. Исследование магнитной восприимчивости углеводородного топлива

Углеводородное топливо можно представить в виде диамагнитного химического соединения с добавлением парамагнитных центров представляющих собой органические радикалы, растворенный кислород и т.п. Углеводородные молекулы топлива не содержат неспаренных электронов и магнитные свойства их обусловлены диамагнетизмом замкнутых электронных оболочек и слабым парамагнетизмом атомных ядер (в данном случае ядер водорода).

При введении диамагнитного вещества в магнитное поле происходит изменение энергии электронной оболочки на величину  $\Delta U$ , что приводит к появлению магнитного момента оболочки  $\mu_z$  и намагниченности вещества:

$$M_z^d = -\frac{e}{2mC} N \sum_{i=1}^z \langle L_z \rangle - \frac{Ne^2}{6mC^2} H_o \sum_{i=1}^z \langle r_i^2 \rangle.$$

Первое слагаемое в формуле связано с ориентацией орбитальных моментов атомов при отсутствии внешнего поля и в нашем случае равно нулю. Второе слагаемое в этом выражении всегда отрицательно и определяет диамагнитную часть намагниченности:

$$M_z^d = \chi_o^d H_o,$$

где  $\chi_o^d$  – диамагнитная восприимчивость:

$$\chi_o^d = -\frac{Ne^2}{6mC^2} \sum_{i=1}^z \langle r_i^2 \rangle.$$

Диамагнитная восприимчивость очень мала и для конденсированных сред  $\chi_o^d = -(10^{-5} - 10^{-6})$ .

Магнитные моменты таких частиц как кислород, органические радикалы и другие элементы топлива, обладающие электронным парамагнетизмом,

ориентируются под действием внешнего магнитного поля и намагниченность их пропорциональна внешнему магнитному полю  $H_0$ .

$$M_z^P = \chi_0^P H_0$$

Поскольку моменты ориентируются в направлении поля, то  $\chi_0^P > 0$ .

Для рассматриваемого эффекта намагниченность вещества, в котором имеются ядерные моменты и существует сверхтонкое взаимодействие последних с магнитными моментами неспаренных электронов, обусловлена полными магнитными моментами атомов и молекул находящихся в возбужденном состоянии. Взаимодействие ядерных спинов водорода, получивших энергию переменного электромагнитного поля при ЭФВ, с электронными спинами парамагнитных центров, благодаря электрон – ядерному спиновому взаимодействию, приводит к изменению намагниченности вещества, т.е. при взаимодействии спинов электронов парамагнитных центров со спинами ядер основного химического соединения, куда помещены эти центры, приводит к увеличению диамагнетизма вещества, т.е. происходит обобществление электронов каждого из атомов приводя к уменьшению парамагнетизма растворенного кислорода.

Экспериментальные исследования магнитной восприимчивости топлив на установке, принцип действия которой основан на определении изменения резонансной частоты высокочастотного колебательного контура, показали увеличение диамагнетизма топлива (рис. 3.13).

В процессе измерения стабильность частоты выдерживалась с точностью до  $10^{-8}$ , что позволило определять диамагнитную восприимчивость топлив порядка  $10^{-6}$  с точностью до 0,01%.

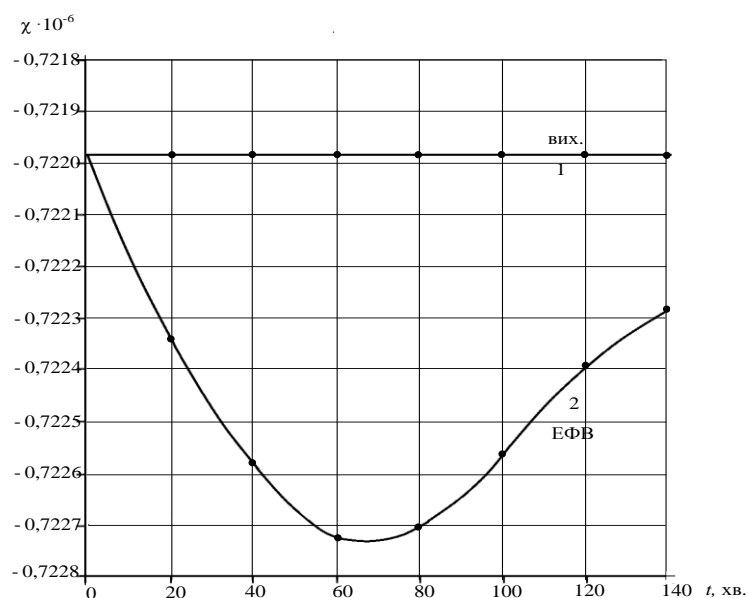


Рис. 3.13. Зависимость диамагнетизма топлива от ЭФВ

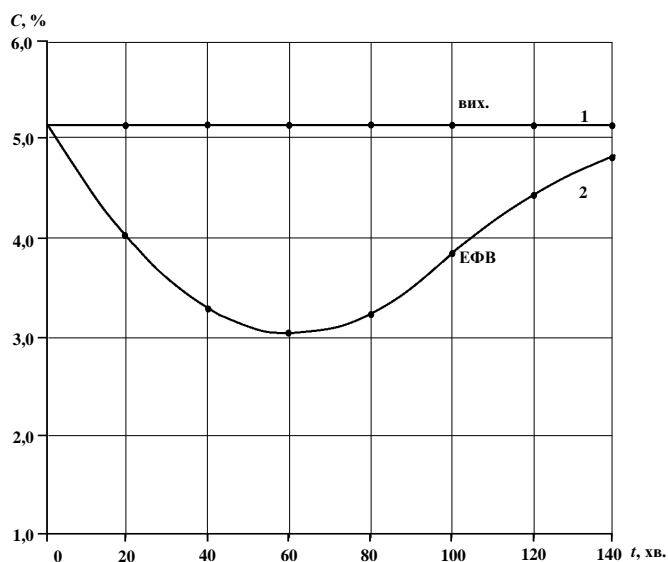


Рис. 3.14. График изменения концентрации кислорода после ЭФВ

На графике видно (рис. 3.13), что максимальное изменение  $\chi^d = 0,7227 \cdot 10^{-6}$  происходит через 60...70 минут после ЭФВ. Это, по-видимому, происходит за счет релаксационных процессов характеризующих обмен энергией между системой ядерных спинов водорода и электронами парамагнитных центров (растворенного  $O_2$ ) образуя диамагнитные комплексы.

С целью проверки высказанного предположения были проведены исследования по определению содержания растворенного кислорода в

углеводородном топливе хроматографическим методом на хроматографе ЛХМ-72.

На рис. 3.14 представлен график изменения концентрации растворенного в топливе кислорода после процесса электрофизического воздействия на топливо. Из графика следует, что концентрация растворенного кислорода постепенно уменьшается и через 60 минут после воздействия на топливо достигает минимального значения (в 1,8 раза ниже исходной концентрации). Затем происходит повышение концентрации кислорода и через 140 минут она достигает исходной величины. Полученные данные хорошо согласуются с изменением магнитной восприимчивости и подтверждают предположение [113].

### **3.3.4. Исследование диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь углеводородных сред**

Углеводородные топлива и масла представляют собой неполярные жидкие диэлектрики в разбавленными в них полярными молекулами небольшой концентрации. Неполярные жидкости, в которых основную роль играет поляризуемость электронного смещения, имеют невысокую диэлектрическую проницаемость, в пределах  $\varepsilon = 1,8 \div 2,5$ . Свойства диэлектриков на переменном токе рассматривают, пользуясь понятием комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

где  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  определяет комплексную емкость  $C$  конденсатора:

$$C = \varepsilon C_0,$$

где  $C_0$  – емкость вакуумного конденсатора.

Тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  выражается формулой:



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  углеводородных жидкостей зависят от температуры. Диэлектрическая проницаемость топлив при изменении температуры меняется незначительно и практически линейно, что полностью согласуется с теорией диэлектриков [13] и аналитическая зависимость  $\varepsilon$  от температуры для испытуемых нефтепродуктов выражается уравнением прямой линии:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 - \alpha t_o,$$

где  $\varepsilon_t$  – диэлектрическая проницаемость при данной температуре;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент  $\varepsilon$  и имеет порядок  $10^{-3}$  град $^{-1}$ ;  $t^o$  – температура жидкости.

Образование смол и нерастворимых осадков в нефтяных топливах при хранении и применении происходит в первую очередь за счёт окисления нестабильных компонентов топлив. Исходное топливо можно рассматривать как истинный раствор кислородных, сернистых, азотистых и других соединений в углеводородной среде. В определенных условиях при повышении температуры и контакте с кислородом нестабильные углеводороды и гетероорганические соединения окисляются, что приводит к увеличению их молекулярного веса, а следовательно и к изменению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Первичные продукты окисления полностью растворимы в топливах, но в дальнейшем, по мере увеличения глубины окисления и усложнения состава становятся нерастворимыми. Вследствие этого в топливах гомогенная система превращается в гетерогенную, в которой постепенно увеличиваются размеры частиц второй фазы. Продукты окисления всегда полярны и имеют значительный дипольный момент. Эти частицы несут, как правило, определенный электрический заряд, что и является основой для применения диэлектрического метода контроля качества горюче-смазочных материалов.

Изменение фазового состояния топлив и масел после ЭФВ при нагревании изучали с помощью трехэлектродного емкостного преобразователя в диапазоне температур 293...423К со скоростью нагрева образца два градуса в минуту. Измерение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  проводили электронным измерителем ёмкости Р-5083, в котором питающее напряжение емкостного преобразователя понизили до 50 мВ.

Погрешность измерения  $C$  составляет  $\Delta C = 0,001C + 0,02$  и  $tg\delta = \pm(0,02tg\delta + 5 \cdot 10^{-4})$ . Исследовали влияние ЭФВ на образцы дизельного топлива Л-0,2-40; Л-0,5-40; товарного керосина ТС-1, РТ и минерального масла МС-8п.

Исследования, проведенные с углеводородными средами, показали, что диэлектрическая проницаемость всех образцов топлив и масел зависит от температуры и с повышением  $t$  линейно уменьшается. При нагревании топлива расширяются, вследствие чего в единице объема оказывается меньше молекул и диэлектрическая проницаемость жидкости падает.

Влияние ЭФВ на диэлектрические свойства нефтепродуктов практически не отмечено в данном промежутке времени, что свидетельствует о неизменности структуры углеводородной среды под воздействием ЭФВ, что и подтверждается спектральными исследованиями.

Особого рассмотрения заслуживает зависимость тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  топлив и масел. Температура, состав смеси и химические свойства углеводородов оказывают влияние на стабильность образующихся свободных радикалов и направление окислительного процесса в целом.

Как видно из графиков (рис.3.15, 3.16, 3.17) зависимость  $tg\delta$  от температуры реактивных, дизельных топлив и масел имеет экстремальный характер, который проявляется в диапазоне температур 373...423 К.

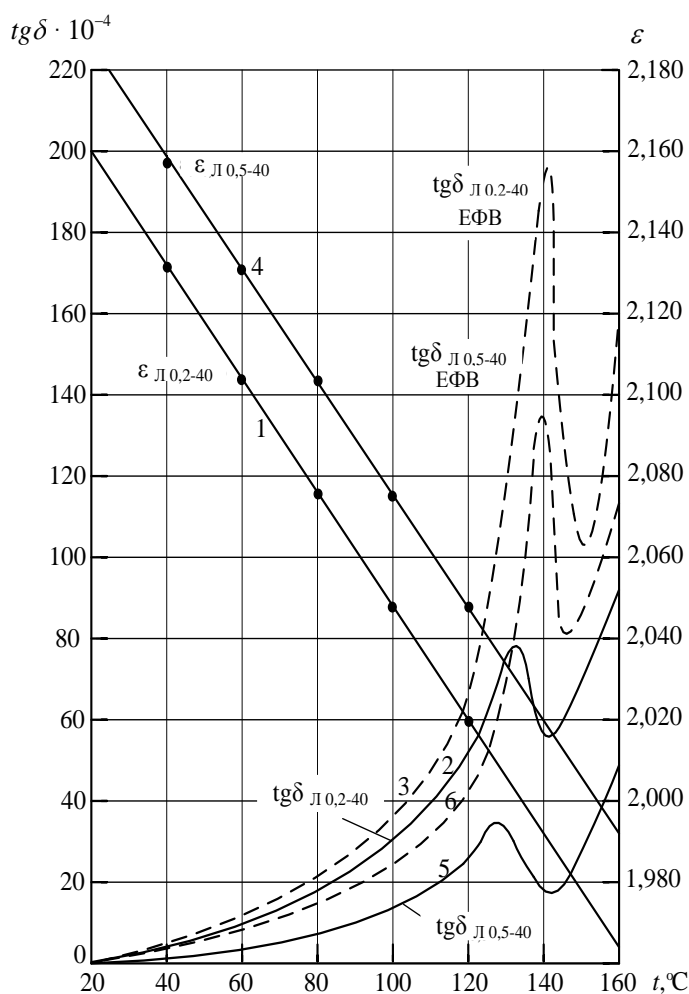


Рис. 3.15. Зависимость тангенса угла потерь  $tg\delta$  дизельных топлив

Благодаря различному влиянию состава нефтепродуктов на процесс окисления углеводородов с ростом температуры выше определенного предела, наблюдается снижение скорости окисления и в определенном интервале, для различных углеводородных жидкостей скорость изменения тангенса угла диэлектрических потерь имеет отрицательное значение. Таким образом, с ростом температуры скорость образования полярных соединений в определенном интервале температур уменьшается. При дальнейшем повышении температуры происходит резкое увеличение  $tg\delta$ , т.е. средняя скорость окисления нефтепродуктов принимает положительное значение и увеличение  $tg\delta$  для различных углеводородных сред невелики.

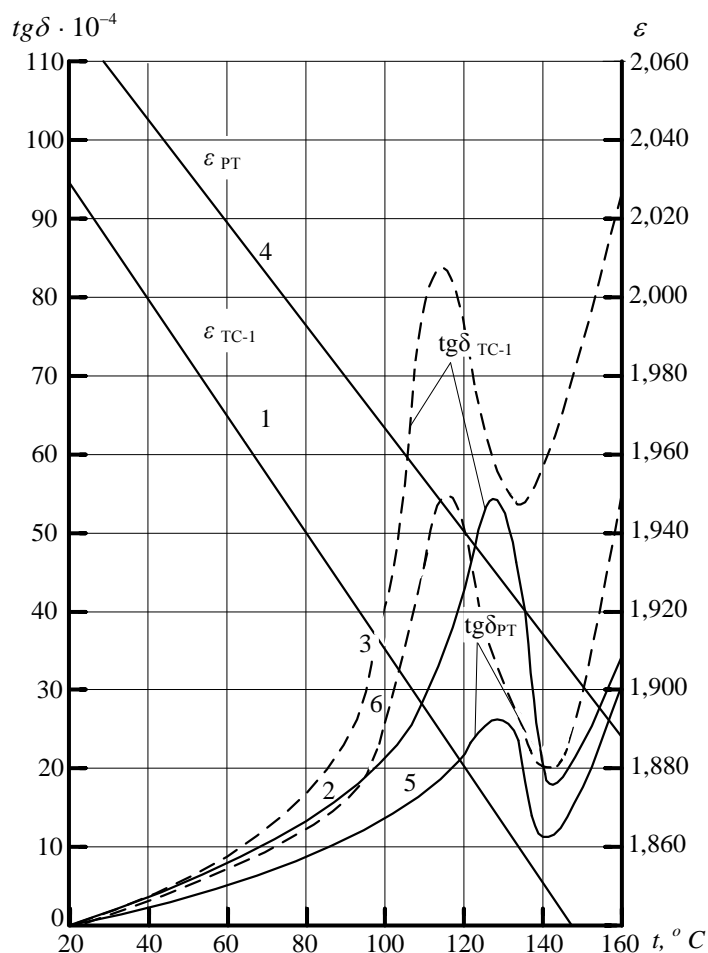


Рис. 3.16. Зависимость тангенса угла потерь  $tg\delta$  реактивных топлив

Т.е., можно сказать, что при повышении температуры молекулы приобретают тепловую энергию и получают возможность ориентироваться в электрическом поле, что приводит к появлению дипольно-ориентационной поляризации.

По мере освобождения молекул дипольно-ориентационная поляризация возрастает с температурой. Затем, когда все молекулы приобретают возможность ориентироваться в электрическом поле, дипольно-ориентационная поляризация проходит через максимум. При дальнейшем росте температуры дипольно-ориентационная поляризация уменьшается из-за того, что тепловое движение мешает молекулам ориентироваться в электрическом поле. Экстремальный характер температурной зависимости скорости образования продуктов окисления отмечался в литературе [94]. Возможной причиной

наблюдаемого эффекта является экстремальная температурная зависимость скорости реакции зарождения цепей по гомогенному механизму.

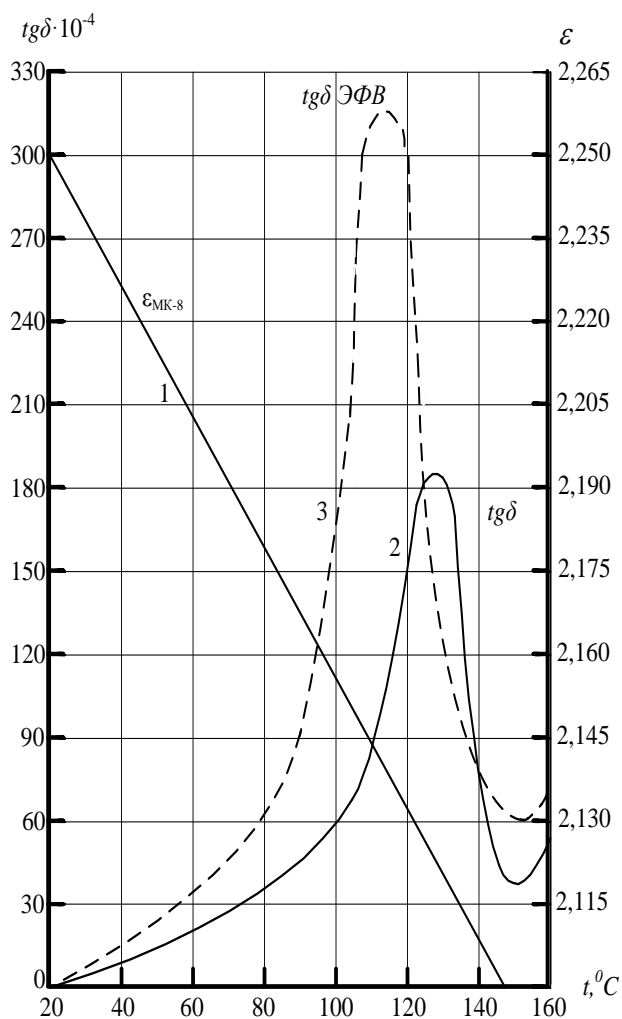


Рис. 3.17. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  масла МС-8п

Влияние электрофизического воздействия на углеводородные топлива и масла, при котором происходит поглощение электромагнитной энергии колебательного контура помещенного в неоднородное магнитное поле, создает благоприятные условия для перехода молекул в возбужденное состояние образуя при этом межмолекулярные ассоциаты и комплексы, что способствует увеличению скорости окисления углеводородов в объеме жидкой фазы.

Из полученных экспериментальных данных зависимости диэлектрических потерь  $tg\delta$  от температуры видно (рис.3.15, 3.16, 3.17), что после ЭФВ диэлектрические потери у всех видов нефтепродуктов в несколько

раз увеличиваются, оставаясь практически неизменными при комнатной температуре.

Резкое увеличение тангенса угла диэлектрических потерь при увеличении температуры жидких углеводородов можно объяснить, по-видимому, формированием ион-радикальных комплексов и комплексов с переносом заряда, что способствует увеличению релаксационных потерь. Увеличение релаксационных потерь в температурном ходе  $tg\delta$  обусловлено повышением числа частиц, которые обуславливают релаксационные потери, т.е. повышение числа дипольных молекул и слабо связанных ионов.

Установленный эффект более высокой скорости окисления топлив после ЭФВ имеет большое практическое значение. В двигателях скорость последующих процессов окисления испаренного топлива существенным образом зависит от "химической предыстории" топлива, т.е. сравнительно легко осуществляемое инициирование окисления капель топлива служит способом регулирования самовоспламенения топлива в двигателях.

Более интенсивное зарождение цепей происходит вследствие реакции между предварительно возбужденными ядрами водорода и растворенного кислорода, что достаточно хорошо коррелируется с опытными данными по определению склонности жидких углеводородов к окислению молекулярным кислородом [104].

Для проверки этого предположения были проведены исследования окисления топлива при повышенной температуре с образованием смол.

Исследования проводили методом определения фактических смол (по Бударову) . Содержание фактических смол определяли для исходного топлива и для топлива, подвергнутого электрофизическому воздействию. Результаты исследований приведены в таблице 3.1.

Как следует из таблицы 3.1, содержание фактических смол при нагревании топлива после электрофизического воздействия увеличивается в пять раз для топлива ТС-1 и в три раза для РТ.

Содержание фактических смол топлива

Содержание фактических смол на 100 мл топлива, мг	Топливо ТС-1	Топливо РТ
Для исходного топлива	1,4	4,5
Для топлива после ЭФВ	6,7	12,6

Наличие прямой корреляционной связи между смолами и кислотностью, из-за ряда методических погрешностей по определению фактических смол, позволяет судить о степени окисляемости систем по показателю кислотности определяемого по ГОСТ 5985. Проведенные исследования показателя кислотности дизельного топлива свидетельствуют, что электрофизическое воздействие на дизельное топливо приводит к увеличению его кислотности на 25-30%. Это говорит об увеличении кинетической скорости процесса вступления кислорода в реакцию окисления [79].

### **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3**

1. На основании результатов теоретического исследования, изложенного в разделе II, создано устройство для электрофизического воздействия на топливо и исследована его эффективность.

2. Результаты проведенных исследований влияния ЭФВ на углеводородное топливо показали, что постоянное магнитное поле при статическом воздействии оказывает влияние на физические и физико-химические свойства топлив.

3. Установлено, что воздействие резонансного электромагнитного поля и неоднородных постоянных магнитных полей приводит к увеличению диамагнетизма углеводородной жидкости за счёт сверхтонкого взаимодействия возбуждённых ядерных спинов водорода и электронами парамагнитных центров (растворённого кислорода) образуя диамагнитные

комплексы. Определение концентрации растворённого кислорода в углеводородной жидкости подтверждают это предположение.

4. Показано, что ЭФВ создает благоприятные условия для перехода молекул в возбужденное состояние образуя при этом межмолекулярные ассоциаты и комплексы, что способствует увеличению скорости окисления углеводородов в объеме жидкой фазы.



## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УГЛЕВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО**

### **4.1. Полнота сгорания и нагарообразование низкомолекулярных топлив**

Полнота сгорания и склонность к нагарообразованию является основными эксплуатационными характеристиками углеводородных топлив, которые имеют большое практическое значение при повышении экономичности и ресурса двигателя.

О склонности к нагарообразованию судят по количеству нагара, который отлагается на стенках камер сгорания, при этом нарушается аэродинамика потока, происходит местный перегрев, коробление и растрескивание жаровых труб. Частицы нагара, уносимые газовым потоком, вызывают эрозию металлических поверхностей. При отложении нагара на форсунках изменяется форма распыленной струи, снижается эффективность сгорания топлива [51].

Применение квалификационных методов испытаний горюче-смазочных материалов в совокупности с физико-химическими методами исследований, при минимальном расходе средств и испытуемых образцов жидкости, позволяет надежно оценить их эксплуатационные свойства, т.е. с помощью квалификационных методов удается ускорить оценку эксплуатационных свойств топлив и смазочных материалов, выявить оптимальный режим и эффективность электрофизического способа воздействия [26, 104].

Проведены исследования по определению влияния электрофизического воздействия на характеристики сгорания углеводородных топлив на малоразмерной установке. Метод позволяет дать сравнительную оценку полноты сгорания и нагарообразования топлив для двигателей при небольшом объеме затрачиваемого на испытание топлива. В качестве исследуемого

объекта брали авиационное топливо марки ТС-1. Испытание контрольного образца топлива и образца, подвергнутого электрофизическому воздействию, производили на одном и том же стенде.

Камера сгорания выполнена по типу камеры сгорания турбореактивного двигателя ВК-1. Жаровая труба малоразмерной камеры выполнена разборной. Температура выхлопных газов регистрировали с помощью потенциометра ЭПП-09МЗ (11 точек замера по периметру сопла камеры сгорания). Непосредственно перед камерой сгорания в систему стенда включено устройство для электрофизического воздействия на топливо.

При снятии характеристик по полноте сгорания выдерживали постоянными следующие условия: расход воздуха, поступающего в камеру сгорания, 0,25 кг/с; давление воздуха перед камерой сгорания, 0,025 кг/см<sup>2</sup>; температура воздуха, перед камерой сгорания, 333К (60°С); состав рабочей смеси – коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1$ .

Постоянный состав рабочей смеси - коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1$  устанавливали изменением расхода топлива. На установленном режиме работали не менее 3-х минут, после чего фиксировали все измеряемые величины. Коэффициент полноты сгорания  $\eta$  испытуемого топлива определяли по тепловому балансу.

Контрольные испытания на товарном топливе ТС-1 показали, что при постоянном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$  полнота сгорания достаточно велика и  $\eta_{исх} = 0,940$ , а отклонения коэффициента полноты сгорания составляли менее  $\Delta\eta = \pm 0,010$ . Однако, после электрофизического воздействия на топливо происходит увеличение полноты сгорания  $\eta_{исх} = 0,956-0,960$ , что можно объяснить повышением реакционной способности углеводородных соединений в начальной стадии реакции в присутствии в топливе возбужденного молекулярного кислорода.

С полнотой сгорания топлив тесно связана возможность образования нагара и появления смолистых, углистых и коксообразных отложений в

двигателях. Перед оценкой топлив на склонность к нагарообразованию среднюю часть жаровой трубы малоразмерной камеры сгорания очищали от нагара, сушили при температуре 420 К, взвешивали с точностью до  $\Delta m = 0,01$  г, затем камеры монтировали на стенд.

Таблица 4.1

Нагарообразования топлива в камере сгорания  
для турбореактивного двигателя ВК-1

Наименование	Показатели	
	Коэффициент избытка воздуха	Нагарообразование в камере сгорания, г
Топливо ТС-1		
1	1,0	5,3
2	1,0	5,3
3	1,0	5,2
Топливо ТС-1 после ЭФВ		
$H = 80$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,40
$H = 160$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,19
$H = 480$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,70
$H = 640$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	5,20

Испытания проводили при постоянных условиях эксперимента в течение 1 часа. Затем камеру снимали, разбирали и среднюю часть жаровой трубы с отложившимся в ней нагаром, после удаления растворимых осадков и сушки, взвешивали. По разности взвешиваний до и после испытания определяли количество нагара.

Эксперименты показали, что при контрольном топливе количество нагара составило  $m_{исх} = 5,30 \dots 5,50$  г, а после ЭФВ  $m_{ЭФВ} = 4,10 \dots 4,20$ , т.е. происходит уменьшение отложения нагара на стенках камеры на 20...25%, при погрешности измерений по количеству нагара не более чем на 5%.

Возникновение нагара на горячих деталях стенок камеры сгорания и днища поршня было исследовано моторным методом с использованием одноцилиндровой установки "Petter" W-1. Проведены испытания масла М-10Б<sub>2</sub> с целью определения нагаров и лаков на поверхностях деталей.

Для проведения испытаний в картер двигателя заливали 1 кг испытуемого масла М-10Б<sub>2</sub>. После подсоединения электроподогревателя масла двигатель запускали в работу. Режим работы двигателя "Petter" W-1 выбирали следующим: обороты –  $1500 \pm 10$  мин<sup>-1</sup>, нагрузка –  $2,2$  кг/см<sup>2</sup> по указателю нагрузки гидротормоза, расход топлива 20 мл за  $t = 55 \pm 0,5$  с, давление масла  $P = 0,56 \pm 0,21$  кг/см<sup>2</sup>, температура охлаждающей жидкости на входе  $t_{вх} = 146 \pm 4$ °С, на выходе  $t_{вых} = 150 \pm 1$ °С, температура масла  $t_m = 137 \pm 1$ °С. Испытания проводили в течении 36 часов с момента выхода на режим. После проведения испытания на контрольном образце масла М-10Б<sub>2</sub> было проведено ЭФВ и испытания были продолжены в той же последовательности, что и с контрольными образцами масел.

В качестве основных оценочных показателей в указанном методе принимали отложения на головке и юбке поршня, оцененные по цветовой десятибалльной шкале в баллах. Результаты испытаний масла М-10Б<sub>2</sub> приведены в табл.4.2

Таблица 4.2.

#### Исследование масла М-10Б<sub>2</sub>

Показатели	Масло М-10Б <sub>2</sub>	
	До ЭФВ	После ЭФВ
Состояние поршневых колец, баллы	0	0
Отложения, баллы:		
на головке поршня	2,9	0,5
на юбке поршня	0,6	0,3
на внутренней поверхности головки поршня	1,78	1,4
Общая оценка, баллы	5,28	2,2

Из таблицы видно, что накопление нагара, после ЭФВ на масло М10Б<sub>2</sub>, на головке поршня снижается в 5 раз, а на юбке в два раза. Общая оценка нагарообразования в баллах снижается почти в 2,5 раза. При этом было отмечено, что лаковые отложения имеют более светлые (светлокоричневые) тона, чем масло без ЭФВ, т.е. скорость превращения тонкого масляного слоя в

лак, а также количество лака, образующегося при окислении, находится в зависимости от "предыстории" масла.

На рис. 4.1. представлены поршни после проведения испытания контрольного образца масла (правый образец) и после ЭФВ на масло (левый образец). Определение коксуемости масла М–10Б<sub>2</sub>, как показателя качества нефтепродуктов, характеризующего склонность к образованию лака и нагара в двигателе внутреннего сгорания проводили методом определения коксуемости [80].



Рис. 4.1. Поршни после проведения испытания: контрольного образца масла (правый образец) и после ЭФВ на масло (левый образец).

Результаты исследований сведены в табл.4.3. Из полученных результатов следует, что фактическое расхождение между параллельными определениями коксуемости масла подвергнутого ЭФВ находились в пределах 0,01...0,03%, что значительно ниже допустимых расхождений, равных 0,3%.

Таблица 4.3.

Определение коксуемости масла М–10Б<sub>2</sub>

Наименование	Номер образца	Коксуемость, %	Среднее значение коксуемости, %
Исходное масло М–10Б <sub>2</sub>	–	1,33	1,33
Масло М–10Б <sub>2</sub> после ЭФВ	1	1,2	1,196
	2	1,18	
	3	1,21	

Полученные результаты по определению коксуемости хорошо согласуются с предыдущими экспериментами по определению эффективности электрофизического воздействия на данные характеристики и показывают, что после ЭФВ на моторное масло М-10Б<sub>2</sub> происходит уменьшение коксового числа на 8–10%.

#### **4.2. Влияние ЭФВ на экономические и экологические показатели работы теплового двигателя**

Важнейшим показателем качества дизельных топлив является склонность к воспламенению при соприкосновении с воздухом. Воспламеняемость топлив оценивается цетановым числом (ЦЧ) от величины которого, в свою очередь зависит продолжительность периода задержки воспламенения  $\tau_i$  (ПЗВ) топлива [57, 106].

Для оценки стандартной характеристики (ЦЧ) исследуемого дизельного топлива использовали специальную одноцилиндровую установку ИДТ-90 с рабочим объемом цилиндра двигателя 652 мл и переменной степенью сжатия.

Расхождения при определении цетанового числа, по методу совпадения вспышек, исходного топлива не отличались от среднего арифметического сравниваемых результатов более чем на  $\pm 1,4$  цетановые единицы.

Определение воспламеняемости дизельного топлива на установке ИДТ-90 заключалось в сравнении исследуемого исходного образца топлива и образца топлива подвергнутого ЭФВ с эталонными топливами, воспламеняемость которых известна (смесь двух индивидуальных углеводородов: цетана-н-генсадекана  $C_{16}H_{34}$  и  $\alpha$ -метилнафталина –  $C_{11}H_{10}$ ).

Проведенные испытания показали, что после электрофизического воздействия на дизельное топливо происходит увеличение цетанового числа на 2,5...3,5 единицы. Увеличение цетанового числа говорит о повышении воспламеняемости углеводородного топлива, т.е. об уменьшении периода задержки воспламенения  $\tau_i$ , который определяется по формуле Н.Н. Семенова [51, 115]:

$$\tau_i = \frac{const}{A_{cm}} P^{-\nu} e^{\frac{E_a}{RT}},$$

где  $A_{cm}$  – множитель, зависящий от состава реагирующей смеси;  $\nu$  – суммарный порядок реакции разветвления;  $P$  – давление воздуха в цилиндре;  $E_a$  – энергия активации;  $T$  – температура реагирующей смеси.

Изменение ЦЧ характеризует только одну из составляющих общего периода задержки воспламенения, а именно  $\tau_{хим}$ , в то время, как  $\tau_{физ}$  испытании на одном и том же двигателе остается практически постоянной величиной. Продолжительность нахождения топлива в капельном состоянии невелика, исчисляется долями секунды, в то время как скорость окисления с образованием пероксидов и других легковоспламеняющихся продуктов неполного окисления весьма значительна и зависит от энергии активизации  $E_a$ . Скорость химической реакции горения по топливу в данный момент времени пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ в тот же момент времени:

$$W_f = \frac{dC_f}{d\tau} = k_f C_f^{\nu_f} C_k^{\nu_k}$$

где  $k_f$  – константа скорости реакции;  $C_f$ ,  $C_k$  – концентрация соответственно топлива и кислорода;  $\nu_f$ ,  $\nu_k$  – порядки реакции соответственно по топливу и кислороду;  $\tau$  – время.

Зависимость константы скорости химической реакции определяется по закону Аррениуса:

$$K_f = k_o \sqrt{T} e^{\frac{-E_a}{RT}},$$

где  $k_o$  – коэффициент, зависящий от молярных масс вещества и размеров реагирующих молекул;  $e^{-E_a/RT}$  – экспоненциальная функция Аррениуса, выражающая зависимость скорости реакции от энергии активации и температуры. Следовательно, при уменьшении энергии активации  $E_a$ , как следствие электрофизического воздействия на энергию межмолекулярного

взаимодействия между молекулами топлива и кислорода, скорость реакции горения по топливу  $W_f$  возрастет. Благодаря уменьшению  $\tau_i$ , длительность первой фазы (ПЗВ) сокращается и следовательно меньшая доля топлива попадает за это время в цилиндр двигателя. Это приводит к сдвигу начала второй фазы (быстрого горения) влево от ВМТ. Уменьшение количества топлива в период задержки воспламенения  $\tau_i$ , но достаточного для устойчивого воспламенения смеси, приводит к получению наилучшего показателя жесткости и экономичности рабочего процесса дизеля.

Повышение скорости реакции окисления  $W_f$  в основной фазе горения является одним из требований улучшения экономичности и способствует увеличению полноты сгорания. Улучшение процессов сгорания топлива в предыдущих фазах приводит к сокращению фазы догорания, что влечет за собой уменьшение температуры отработавших газов (ОГ).

Стендовые исследования влияния электрофизического воздействия на дизельное топливо по определению мощностных, экономических и токсических показателей работы автомобильного дизеля проводили на экспериментальной установке, созданной в лаборатории отдела исследования методов экономии автомобильного топлива НПО «ДЕРЖАВТОТРАНСНДПРОЕКТ».

Испытания проведены на полноразмерном четырехтактном четырехцилиндровом дизеле фирмы "Mercedes-Benz" и дизеле автомобиля КамАЗ - 740. В состав стенда (рис. 4.2) входит двигатель (1), соединенный карданным валом с электродинамической нагрузочной установкой "ZÖLLNER – Kiel" В-350АС (Германия) (5), весовой расходомер топлива с погрешностью 0,5% (2) и контрольно-измерительная аппаратура (3,4). Дымность отработавших газов измеряли дымометром "Hartridge" МК-3 (Великобритания), а концентрацию оксидов азота – хемилюминесцентным газоанализатором  $NO/NO_x$  344-ХЛ-01. Устройство ЭФВ устанавливали в топливную систему дизеля между топливоподкачивающим насосом и топливным насосом высокого давления.



Снятие нагрузочной характеристики дизеля фирмы "Mercedes-Benz" проводили при серийной системе питания и регулировке двигателя согласно инструкции по эксплуатации. Нагрузочную характеристику двигателя определяли при постоянной частоте вращения коленчатого вала, равной  $2500 \text{ мин}^{-1}$ , что соответствует максимальному крутящему моменту. Нагрузка при этом изменилась от нуля до максимальной. Определяли частоту вращения коленчатого вала, крутящий момент двигателя, расход топлива и воздуха, дымность ОГ, содержание оксида углерода, углеводородов и оксидов азота в ОГ.

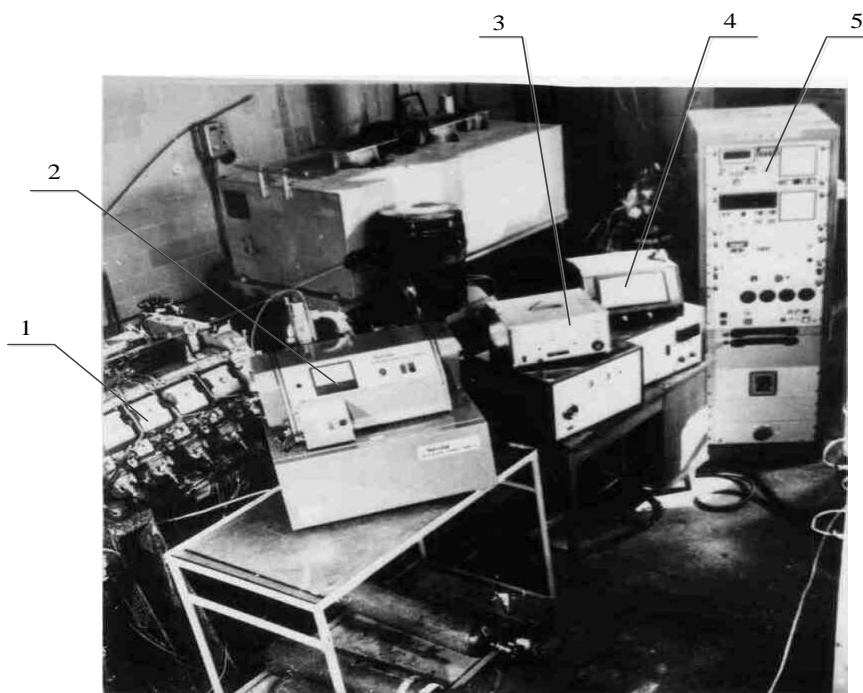


Рис. 4.2. Стенд для проведения испытаний  
автомобильного дизеля КамАЗ-740

На стенде проведены сравнительные испытания на дизеле КамАЗ-740 по определению нагрузочной характеристики дизеля (рис. 4.3) при частоте вращения коленчатого вала  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  соответствующей максимальному крутящему моменту. При этом регистрировали: крутящий момент  $M_k$  на валу двигателя, расход топлива, концентрацию  $NO_x$  и дымность отработавших газов. Результаты испытаний сведены в таблицу 5.

Таблица 4.4.

## Нагрузочные характеристики дизеля КамАЗ-740

Режим	Параметр	Значение параметра		
		Серийная система питания	Посля ЭФВ	%
$M_e = 80$ Нм	$N_e$ , кВт	20,94	20,94	0
	$G_T$ , кг/год	8,07	7,41	8,18
	$g_e$ , г/кВт · год	385,0	354,0	8,05
	$K$ , %	18,0	13,0	27,77
	$CO$ , %	0,035	0,021	40,0
	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	83,0	78,0	6,02
	$NO_x$ , млн <sup>-1</sup>	3400,0	2900,0	14,7
$M_e = 60$ Нм	$N_e$ , кВт	15,71	15,71	0
	$G_T$ , кг/год	6,95	6,64	4,4
	$g_e$ , г/кВт · год	442,0	423,0	4,3
	$K$ , %	18,0	13,0	27,8
	$CO$ , %	0,03	0,017	43,3
	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	64,0	52,0	18,75
	$NO_x$ , млн <sup>-1</sup>	2390,0	1860,0	22,2
$M_e = 40$ Нм	$N_e$ , кВт	10,47	10,47	0
	$G_T$ , кг/год	5,73	5,66	1,22
	$g_e$ , г/кВт · год	549,0	546,0	0,55
	$K$ , %	17,0	16,0	5,88
	$CO$ , %	0,03	0,012	60,0
	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	36,0	30,0	16,66
	$NO_x$ , млн <sup>-1</sup>	2890,0	1900,0	34,25
$M_e = 20$ Нм	$N_e$ , кВт	5,24	5,24	0
	$G_T$ , кг/год	4,84	4,6	4,95
	$g_e$ , г/кВт · год	924,0	878,0	4,97
	$K$ , %	15,0	15,0	0
	$CO$ , %	0,016	0,015	6,25
	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	27,0	26,0	3,70
	$NO_x$ , млн <sup>-1</sup>	2520,0	1900,0	24,6
$M_e = 0$ Нм	$N_e$ , кВт	0	0	0
	$G_T$ , кг/год	3,78	3,75	0,8
	$K$ , %	17,0	16,0	5,88
	$CO$ , %	0,02	0,015	25
	$C_m H_n$ , млн <sup>-1</sup>	27	27	0

Электрофизическое воздействие на дизельное топливо проводили на разработанной установке ЭФВ, изготовленной для непосредственного включения в топливную систему автомобиля.

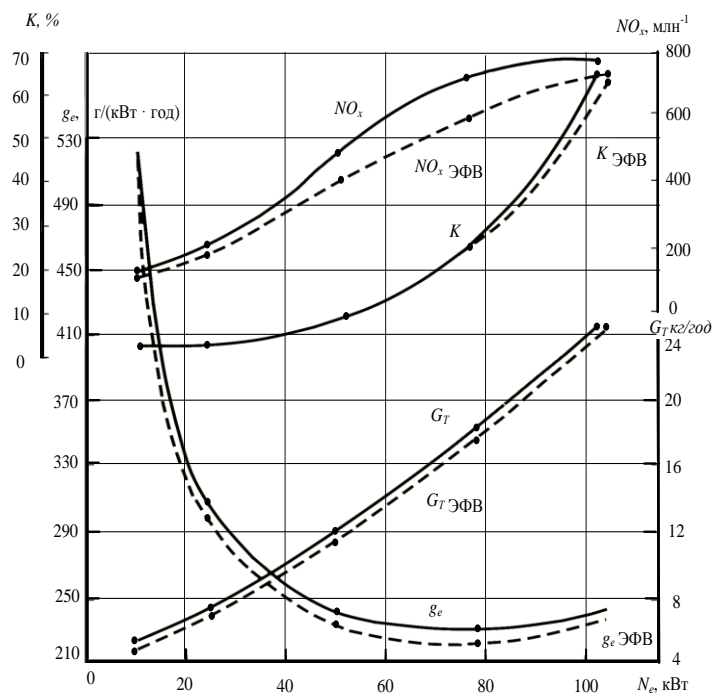


Рис. 4.3. Нагрузочная характеристика дизеля КамАЗ-740 ( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ )

Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что электрофизическое воздействие на дизельное топливо, при различных значениях крутящего момента  $M_k$ , приводит к уменьшению часового  $G_T$  и удельного  $g_e$  расходов топлива на 1,5–2,5 %.

При работе двигателя на холостом ходу с частотой вращения  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$  отмечено снижение часового расхода топлива  $G_T$  на 5–6 %. Установлено, что концентрация оксидов азота  $NO_x$  снижается с увеличением нагрузки количество  $NO_x$  уменьшается на ~ 20 %, а дымность  $K$  практически на каждом режиме работы двигателя остается неизменной.

Проведены эксплуатационные испытания устройства электрофизического воздействия на дизельное топливо, установленного на автомобиле-самосвале БелАЗ-7519 грузоподъемностью 110 т. в карьере Анновского СевГОКа. Для

сравнения результатов топливной экономичности работы автомобиля-самосвала приняты смены с одинаковыми маршрутами транспортирования и экскаваторами. Результаты топливной экономичности приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5.

Эксплуатационные исследования дизельного топлива при электрофизическом воздействии

Номер экскаватора	Без устройства ЭФВ			С устройством ЭФВ			Повышение топливной экономичности, %
	Грузооборот, ткм	Расход топлива, л	Удельный расход топлива на 1 г/ткм	Грузооборот, ткм	Расход топлива, л	Удельный расход топлива на 1 г/ткм	
БелАЗ №1	2746,8	420	126,1	4204,6	590	115,8	5,87
				4408	650	121,7	
				2371	340	118,3	
Средне-взвешенное	2746,8	420	126,1	10983,6	1580	118,7	
БелАЗ №2	6036,8	950	129,9	6475	950	121	5,06
	1918,4	295	126,7	8396	1190	116,9	
Средне-взвешенное	7955,2	1245	129,1	14871	2140	118,7	
БелАЗ №3	4802	690	118,5	6831	940	113,5	4,22
Средне-взвешенное	4802	690	118,5	6831	940	113,5	
Итого	155504	2355	125,3	32685,6	4660	117,6	5,05

Определение экологических показателей карбюраторных двигателей автомобилей ГАЗ-66-11 и ГАЗ-24-10, на режиме холостого хода и электрофизического воздействия на бензин, показало снижение концентрации оксида углерода  $CO$ . Концентрация  $CO$  в отработавших газах для исследованного автомобиля ГАЗ-66-11 составила 0,64–0,7 %. После установки разработанного устройства ЭФВ в топливную систему автомобиля токсичность ОГ была существенно снижена и концентрация  $CO$  составила 0,1...0,15 %. При этом отмечено некоторое увеличение содержания в ОГ углеводородов  $C_mH_n$ , но в пределах нормы. Для определения  $CO$  и  $C_mH_n$  в отработавших газах использовали газоанализаторы 121 ФА 01 ( $CO$ ) и 123 ФА 01 ( $C_mH_n$ ).

Уменьшение  $CO$  на режиме холостого хода при работе двигателя с малой частотой вращения можно объяснить, по-видимому, улучшением смесеобразования после электрофизического воздействия на бензин.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания зависят от "предыстории" топлива, изменяющий их эксплуатационные свойства.

Очевидно, что ЭФВ создает благоприятные условия для интенсивного перехода молекул из основного состояния в возбужденное, что способствует увеличению скорости процессов окисления углеводородов с аномально высокой скоростью, при повышенных температурах, на несколько порядков превышающей скорость окисления углеводородов без ЭФВ.

Электрофизическое воздействие или "предыстория" топлива является ключом к повышению инициирования окисления капель топлива, т.е. способствует увеличению скорости разветвления окислительных цепей и образования новых реакционных центров.

#### **4.3. Влияние магнитного поля на загрязнения и механические примеси**

Надежность работы системы топливоподачи в большой степени зависит от эффективности топливных фильтров. Для дизельных двигателей вопросы чистоты топлива имеют большое значение. Это связано с тем, что вязкое дизельное топливо труднее очистить от механических примесей, чем бензин. Даже мельчайшие посторонние частицы могут привести к ускоренному износу и задиру точно обработанных поверхностей плунжерных пар, нагнетательных клапанов и игл распылителей, имеющих очень высокую чистоту поверхности и малую величину диаметрального зазора. Размеры посторонних частиц в дизельном топливе обычно достигают 50...60 мкм и состоят они на 30...70 % из неорганической части и на 30...70 % из органической. Наиболее опасными являются частицы размером 6...12 мкм [123].

Все загрязнения и механические примеси в углеводородных жидкостях по магнитным свойствам можно разделить на ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики. Сами углеводородные жидкости (топливо, масло) представляют собой диамагнитные вещества.

Величина магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ очень мала ( $\chi^d = -10^{-6} \dots 10^{-7}$ ;  $\chi^p = 10^{-3} \dots 10^{-6}$ ), причем у диамагнитных веществ она отрицательна. Для ферромагнетиков намагниченность ( $I = \chi^f H$ ) является нелинейной, так как существует сильная зависимость магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля, при этом восприимчивость этих веществ достигает очень больших значений (до  $10^6$ ). Так, для технического железа максимальная магнитная проницаемость равна 5000. При протекании топлива через неоднородное магнитное поле на его составляющие действует пондеромоторная сила, которая в зависимости от магнитной восприимчивости веществ, составляющих топливо, будет иметь определенную величину и направление

$$F_z = m(\chi_{\text{част}} - \chi_{\text{сп}})H_o \frac{dH}{dz}$$

где  $\chi_{\text{част}}$  и  $\chi_{\text{сп}}$  – удельная магнитная восприимчивость соответственно частицы и окружающей среды;  $m$  – масса частицы.

В случае ферромагнетизма загрязнений, когда магнитной восприимчивостью среды можно пренебречь, формула принимает более простой вид

$$F_z = m\chi_{\text{част}}H \frac{dH}{dz} = m\sigma \frac{dH}{dz},$$

где  $\sigma$  – удельная намагниченность загрязнений.

Магнитное устройство для электрофизического воздействия на топливо одновременно может служить и для фильтрации топлива от парамагнитных и ферромагнитных частиц. Так как ферромагнитные (продукты износа, железо и т.д.) и парамагнитные (продукты коррозии, органические асфальто-смолистые вещества – продукты окислительной полимеризации

нестабильных составляющих топлива) частицы за счет воздействия пондеромоторной силы будут адсорбироваться в зонах наибольшего значения градиента магнитного поля.

Проведенные эксперименты по определению фильтрующих свойств магнитного устройства (фильтра), при прокачивании дизельного топлива через него, показали, что в зонах максимального значения градиента магнитного поля  $dH/dz$  на поверхности постоянных магнитов обнаружен налет бурого цвета маслянистого свойства.

Был проведён спектральный анализ обнаруженного порошка по инфракрасным спектрам поглощения (ИК) на спектрометрах Specord IR и UR-20.

Исследованы следующие образцы: а) дизельное топливо – исходное; б) дизельное топливо – после ЭФВ; в) полученные образцы № 1, 2, 2<sup>1</sup> - порошкообразные; г) экстракты четырёххлористым углеродом (ЧХУ), испаренные на пластинке из бромистого калия (KBr), и сухие остатки на фильтре после экстрагирования ЧХУ.

Условия получения спектров следующие:

– для дизельного топлива – кювета с окошками из KBr и толщиной поглощающего слоя 100 мк;

– для образцов № 1 и № 2 – суспензия в вазелиновом масле (раздавленная капля);

– для образца № 2<sup>1</sup> – произвольное количество образца, запрессованное в таблетку KBr.

По ИК спектрам поглощения перечисленных образцов можно сделать следующие предварительные заключения:

1. В порошкообразных образцах № 1, 2 и 2<sup>1</sup> имеются следы дизельного топлива, что подтверждается поглощением в области, характерной для  $-CH_2$  и  $-CH_3$  групп в парафиновой цепочке (720, 1370,

1460 и 2820; 2910 и 2930  $\text{см}^{-1}$  в экстрактах ЧХУ для образцов № 1 и № 2) и 1370; 1460  $\text{см}^{-1}$  – для образца № 2<sup>1</sup> – в таблетке КВr.

2. Образец № 21 со значительным количеством влаги, что подтверждается сильным поглощением в области 1530...1750  $\text{см}^{-1}$  и 2800...3700  $\text{см}^{-1}$ , где поглощают ОН группы. Отдельно записанный спектр КВr, запрессованного в таблетку, и спектр образца № 21 в КВr с КВr – в канале сравнения позволяют исключить наличие влаги в бромистом калии, использованном в качестве матрицы для получения спектра образца.

3. Влажность образца № 21 не даёт возможности определить имеет ли место поглощение в области 1715...1760  $\text{см}^{-1}$ .

4. В образце № 2 и в экстракте ЧХУ из него наблюдается поглощение при 1715...1735  $\text{см}^{-1}$ , характерное для С = О связей и С – О в эфирной группировке.

5. Общим для всех порошкообразных образцов является поглощение при 1030 и 1160  $\text{см}^{-1}$ , что может быть вызвано наличием S = О связей и присутствием конденсированной ароматики. Результаты исследований сведены в табл.4.6.

6. Уменьшение оптической плотности в этой области в спектре дизельного топлива после воздействия по сравнению с исходным даёт возможность предположить, что магнитное устройство выполняет роль фильтрующего элемента и адсорбирует из топлива соединения серы.

Таблица 4.6.

Исследование оптической плотности дизельного топлива

$\nu, \text{см}^{-1}$	$D, \text{ оптическая плотность}$		
	Исходное дизельное топливо	После ЭФВ	n, %
1026	0,336	0,307	8,6
1053	0,278	0,239	14
1068	0,278	0,263	5,4
1163	0,451	0,385	14,6



7. Наличие в порошкообразных образцах эфирных групп свидетельствует об отделении (очистке) смол из дизельного топлива (согласно литературным данным по исследованию нефти и продуктов её переработки для смол характерно наличие эфирных связей).

8. В дизельном топливе после ЭФВ появляются полосы поглощения в области  $1715...1760 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует об окислительных процессах.

Из этого можно сделать вывод, что на поверхности магнитного устройства происходит накопление смолистых веществ находящихся в дизельном топливе, что в свою очередь будет способствовать уменьшению засорению фильтров тонкой очистки; снижению нагарообразования; уменьшению вероятности зависания игл распылителей форсунок; снижению образования отложений на впускных клапанах, которые ускоряют износ двигателя и вызывают пригорание поршневых колец.

#### **4.4. Влияние магнитного поля на испаряемость топлива**

Электрофизическое воздействие на углеводородное топливо может осуществляться не только для улучшения процессов горения в камере сгорания тепловых двигателей, но и для уменьшения потерь от испарения топлива в процессе его транспортирования, хранения и подготовки к использованию в тепловом двигателе.

В процессах транспортирования, хранения и применения все топлива испаряются, и образовавшиеся пары частично рассеиваются в окружающем воздухе, т.е. теряются. Испарение топлив ведет не только к материальным потерям, но часто сопровождается ухудшением эксплуатационных свойств и приводит к загрязнению окружающей среды. Потери топлива от испарения легких фракций определяли по убыли веса продукта весовым методом. Сосуды с исследуемой жидкостью взвешивали на лабораторных аналитических весах типа ВЛА-200гМ.

Исследование испаряемости топлива в открытой стеклянной таре показали (рис. 4.4), что после трехнедельного хранения топлива в магнитном поле потери от испарения при облучении дневным рассеянным излучением составили приблизительно 12,5 %, это на 3...4 % меньше, чем без магнитного поля (16 %). При хранении топлива в темноте, т.е. не подвергая его облучению дневным светом, потери топлива составили через 21 день – 4 %. Воздействие постоянного магнитного поля в данном случае также приводит к уменьшению испаряемости приблизительно на 1 %. Скорость испарения топлива в магнитном поле существенно уменьшается и с увеличением времени эксперимента разница в испарении исследуемых образцов увеличивается. Так через шесть суток разница в потере веса составила около 1 %, а через три недели более чем на 3,5 %. На рис.4.4 приведены данные по влиянию ориентации вектора напряженности магнитного поля на испаряемость товарного топлива. При направлении магнитных силовых линий к поверхности раздела фаз жидкость – воздух потери веса образцов топлива от испарения легких фракций составили в среднем 10 %, а в образцах топлива, где направление магнитных силовых линий было противоположным – около 12 %. Эти данные коррелируются с изменением диэлектрической проницаемости топлива.

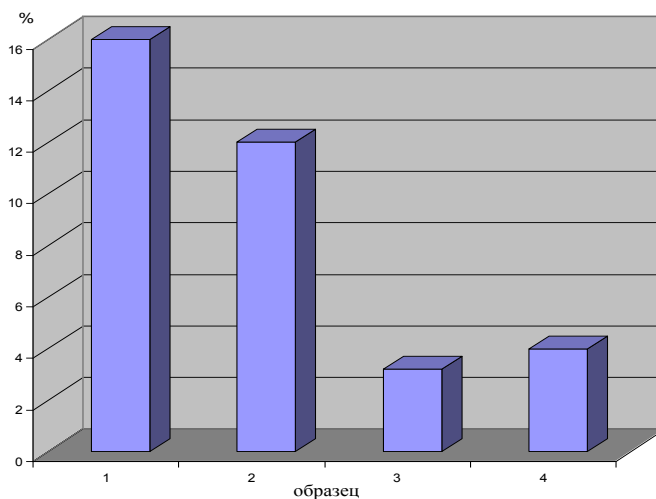


Рис. 4.4. Влиянию ориентации вектора напряженности магнитного поля на испаряемость товарного топлива

Таким образом, постоянное магнитное поле препятствует испарению топлива, что связано с диамагнитными свойствами этих углеводородов, т.е. пондеромоторные силы, которые действуют на углеводородные составляющие в топливе, при наложении магнитного поля, направлены вовнутрь жидкости.

На основании проведённых исследований предложен способ хранения и увеличения длительности индукционного периода окисления углеводородных жидкостей (бензинов) [83].

В основу изобретения поставлена задача: в способе хранения и увеличения длительности индукционного периода окисления нефтепродуктов помещенных в постоянное магнитное поле положено существенное различие между магнитными свойствами жидких углеводородов, которые обладают диамагнитными свойствами и магнитными свойствами кислорода воздуха, свободных радикалов, фактических смол и соединений, склонных к окислению, имеющих ярко выраженный парамагнетизм.

Предложенный способ хранения и увеличения длительности индукционного периода окисления жидких углеводородов (в частности бензинов) основан на использовании магнитного поля постоянных магнитов расположенных на поверхности или над поверхностью раздела жидкость – воздух с достаточной напряженностью, градиентом магнитного поля и ориентацией вектора напряженности постоянного магнитного поля.

В поверхностном слое углеводородной жидкости растворяется значительно больше газов, в том числе и парамагнитного кислорода, чем в остальном объёме диамагнитной углеводородной жидкости. Различие магнитных свойств веществ приводит к расслоению парамагнитных и диамагнитных составляющих жидкости и растворённый в поверхностном слое кислород и другие парамагнитный элементы будут удерживаться, и накапливаться в верхних слоях, а углеводородный состав (диамагнетики) выталкиваются из магнитного поля, т.е. направление движения их будет направлено во внутрь жидкости. Это в свою очередь сказывается на процессе

окисления и накопления растворимых соединений, что и позволяет увеличивать допустимый срок хранения.

Предлагаемый способ хранения углеводородных жидкостей (бензинов) в совокупности с другими известными конструктивными решениями (плавающий понтон на поверхности нефтепродукта и понтон на поплавках с образованием между экраном и поверхностью жидкости газового пространства) по сравнению с ближайшим аналогом и другими способами позволяет реализовать следующие преимущества:

- в данном способе используются магнитные свойства самой жидкости, т.е. в постоянном магнитном поле на составляющие жидкой системы действуют пондеромоторные силы, которые способствуют уменьшению испарения лёгких углеводородных фракций;

- в магнитном поле происходит насыщение поверхностного слоя диамагнитной жидкости парамагнитным кислородом и другими элементами (смолистыми соединениями), что в свою очередь препятствует проникновению молекулярного кислорода воздуха вглубь углеводородной жидкости и тем самым уменьшает скорость процесса окисления, что и способствует более долговременному хранению нефтепродуктов, т.е. пондеромоторные силы, действующие на углеводороды направлены во внутрь жидкости и при этом окисление товарного топлива в магнитном поле при статическом режиме воздействия и свободном доступе кислорода воздуха к поверхности жидкости происходит со значительно меньшей глубиной и скоростью.

#### **4.5. Исследование влияния электрофизического воздействия на противоизносные свойства топлива**

Топливо, перед подачей в камеру сгорания, проходит через топливную аппаратуру, обеспечивающую повышение давления топлива и его очистку. Топливная аппаратура современных машин имеет большое количество различных по назначению и конструкции золотниковых и плунжерных пар, которые осуществляют автоматическое регулирование подачи топлива в

двигатель. Изготавливают их из легированных сталей высокой твердости, таких как, ШХ15, ХВГ, Х12М и др. Анализ отказов свидетельствует, что одной из основных причин выхода из строя топливной аппаратуры является повышенный износ прецизионных пар, где топливо является смазывающей средой [4]. Поэтому одна из задач исследования состояла в оценке изменения противоизносных свойств топлива в результате электрофизического воздействия на его физико-химические свойства.

#### **4.5.1. Противоизносные свойства авиационного топлива**

Проведены эксперименты по изучению влияния электрофизического способа воздействия на противоизносные свойства авиационного топлива. Исследования проводили на образцах гидроочищенного топлива Т-8В и прямогонного ТС-1 в условиях трения скольжения. При трении скольжения металлов в среде топлив в данном приборе создается наиболее тяжелый режим для поверхностных слоев и тонкой граничной пленки, разделяющей поверхность трения. Режим работы установки был следующим: скорость скольжения - 1,18 м/с, осевая нагрузка - 100 Н, время эксперимента - 30 мин, температура в объеме - 293 К.

Были исследованы противоизносные свойства топлив при трех видах воздействия. В первом случае топливо подвергали воздействию магнитного поля двух постоянных магнитов, расположенных последовательно и напряженностью магнитных полей, равной 340кА/м и 156кА/м соответственно. Скорость прокачивания топлива определяли по максимальному сигналу абсорбции, после чего генераторы высокой и низкой частот выключали. В остальных двух случаях на топливо воздействовали электрофизическим способом, т.е. воздействие на топливо происходило в тех же постоянных магнитных полях при включенных генераторах. При этом происходило поглощение электромагнитной энергии колебательного контура системой ядерных спинов водорода, т.е. происходила инверсия и наблюдался сигнал абсорбции. Скорость течения топлива контролировали по максимуму сигнала

абсорбции. В третьем случае дополнительно включили генератор нутации и в поле постоянного магнита 156кА/м наблюдали сигнал эмиссии, что означало отдачу зеемановской энергии системой ядерных спинов водорода колебательному контуру. Материалом для пары трения служила высококачественная легированная сталь со стабильной структурой типа стали ШХ15. Заготовки из стали ШХ15 подвергали термообработке, обеспечивающей твердость рабочих поверхностей  $KPC=58-62$ . Результаты экспериментов представлены на рис.4.5 и 4.6.

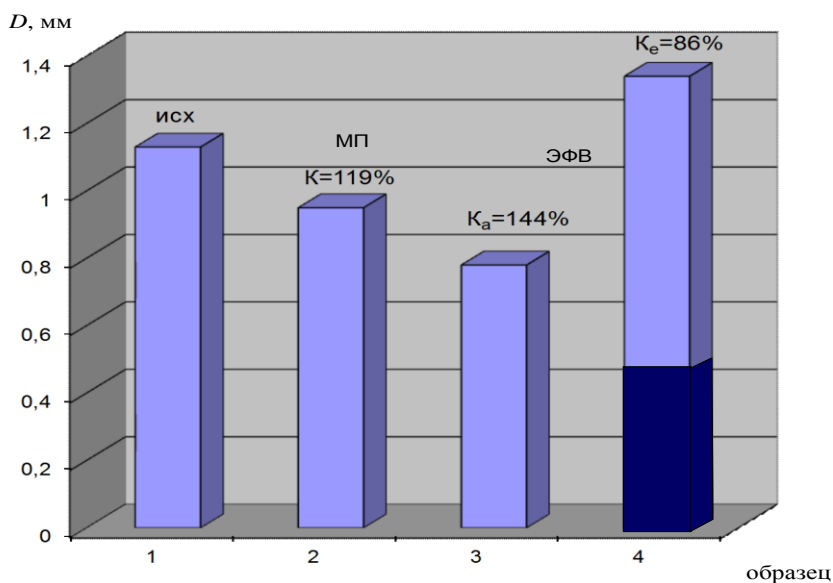


Рис. 4.5. Противознозные свойства авиационного топлива Т-8В

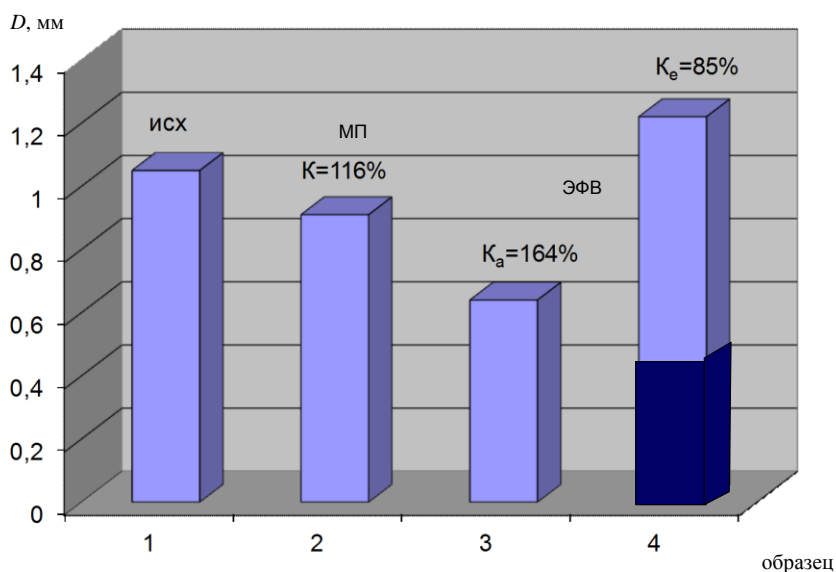


Рис. 4.6. Противознозные свойства авиационного топлива ТС-1

Как видно из данных графиков, воздействие на топлива постоянного магнитного поля приводит к уменьшению износа стали ШХ15 при трении скольжения в среде топлива Т-8В приблизительно на 12...16 %, а в топливе ТС-1 на 10...14 %, что соответствует показателю противоизносных свойств соответственно к  $K \approx 119$  % и  $K \approx 116$  %.

Применение электрофизического способа воздействия при сигнале абсорбции еще больше улучшает противоизносные свойства топлив и уменьшает износ контактирующих поверхностей стали в топливе Т-8В на 26...30 %. ( $K_{Т-8В} \approx 144$  %) и в топливе ТС-1 на 34...38 % ( $K_{ТС-1} \approx 164$  %). При воздействии электрофизического способа, но при получении сигнала эмиссии противоизносные свойства топлив ухудшаются, что приводит к увеличению износа образцов стали в товарных топливах на 16...20 %, показатель противоизносных свойств топлив при этом уменьшается и равен  $K_{Э} \approx 84...86$  %. Отмечено также, что ухудшение противоизносных свойств топлив приводит к схватыванию 30% образцов трения при исследовании эффекта нутации.

Для повышения достоверности определения износа стали ШХ15 при трении скольжения был применен метод эмиссионной спектроскопии, который позволяет определять продукты износа в углеводородной среде, сжигаемой в вольтовой дуге переменного тока. Метод обладает высокой чувствительностью и позволяет определять в топливе содержание всех металлов. Одновременно, определение химического состава проводили масс-спектроскопическим и хроматографическим методами. Исследованию подвергали топливо ТС-1 до и после испытаний по определению противоизносных свойств топлив.

Результаты исследований показали отсутствие железа в исходном образце топлива. В образце топлива после наработки, но без предварительного ЭФВ, обнаружено железа – 0,00048 % веса, а в образце топлива, который перед наработкой был подвергнут электрофизическому воздействию, содержание железа было в два раза меньше – 0,00024 % [32].

Результаты химического состава топлива ТС-1 до и после испытаний приведены в таблице 4.8. При рассмотрении полученных результатов статистически обработанных материалов серии опытов можно увидеть определенную связь между противоизносными свойствами и составом товарного керосина. После электрофизического воздействия и наработки топлива в четыре раза увеличилось содержание смолистых соединений, на ~23 % уменьшилось содержание кислородных соединений и на ~25 % сернистых.

*Таблица 4.8.*

Химический состав авиационного топлива ТС-1

Наименование показателей	Исходное топливо, %	Топливо после наработки	
		Без ЭФВ, %	После ЭФВ, %
Содержание углеводородов:			
- парафиновых соед.	52,50	52,80	52,73
- нафтеновых соед.	32,10	31,75	31,52
- ароматических соед.	13,50	13,35	13,52
Содержание смолистых соединений	–	0,006	0,024
Содержание серы	0,45	0,37	0,27
Содержание кислородных соединений	0,075	0,35	0,27
Содержание азотистых соединений	1,2	1	1,1
Содержание воды	0,0035	0,017	0,018

Снижение содержания железа в два раза свидетельствует об уменьшении износа трущихся поверхностей деталей из стали ШХ15. Все это в комплексе говорит об улучшении противоизносных свойств топлива, а следовательно и о возможности увеличения критической нагрузки.



#### 4.5.2. Противоизносные свойства дизельного топлива

Дизельные топлива также как и авиационные являются смазочным материалом для движущихся деталей топливной аппаратуры (ТА), трущихся пар плунжерных топливных насосов, а насосы высокого давления – это основной и самый сложный агрегат топливоподающей системы дизелей.

Исследование противоизносных свойств дизельных топлив Л-0,2-40 и Л-0,5-40 проводили в условиях трения скольжения при однонаправленном линейном контакте на приборе ПТЛК при фиксированных внешних условиях.

Подготовка рабочей поверхности образца и диска из стали ШХ15 осуществляли на притирочных плитах алмазной пастой до чистоты соответствующей 0,160...0,040 мкм. Режим работы установки:  $V_{ск} = 0,38$  м/с;  $\sigma_H^{max} = 2000$  МПа;  $S = 1000$  м;  $T = 293 \pm 2$  К.

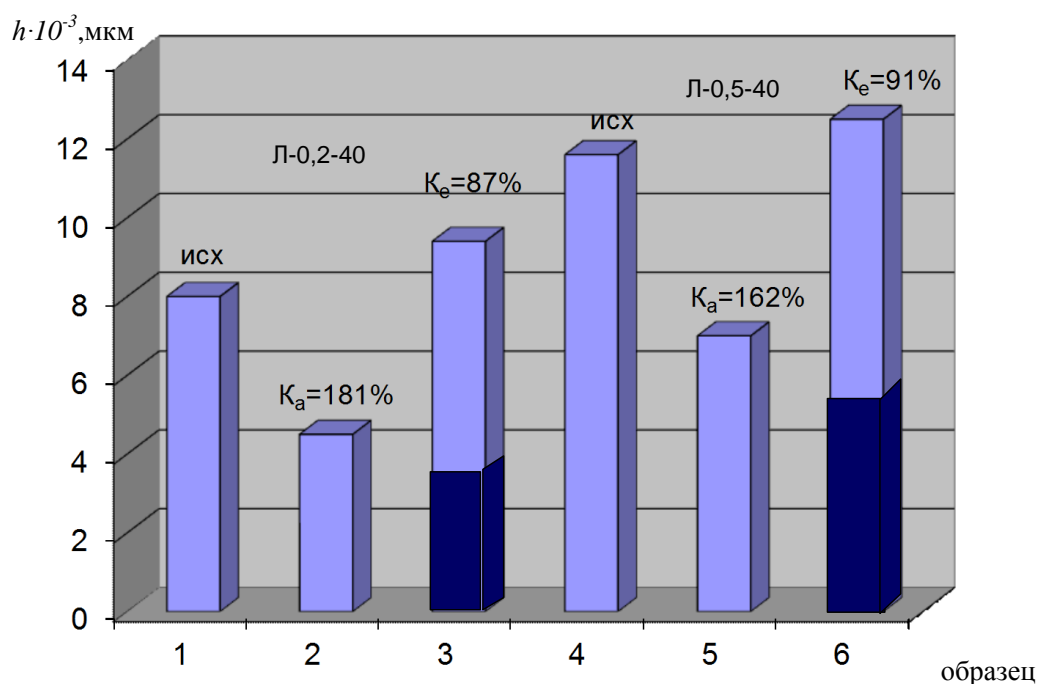


Рис. 4.6. Противоизносные свойства дизельных топлив Л-0,2-40 и Л-0,5-40

Результаты испытаний приведены на рис. 4.6, из которых видно, что применение дизельного топлива с повышенным содержанием серы 0,5 %, способствует увеличению износа на 40...50 % по сравнению с испытанием в топливе с меньшим количеством серы – 0,2 %, т.е. с увеличением содержания серы и сернистых соединений в дизельных топливах их противоизносные свойства ухудшаются. Данные результаты хорошо согласуются с работами [95].

Электрофизическое воздействие (сигнал абсорбции) на дизельные топлива с различным содержанием серы приводит к снижению износа пары трения из стали ШХ15 в дизельном топливе Л-0,2-40 на 42-46 %, а в топливе Л-0,5-40 – 34...38 %, т.е. ЭФВ способствует улучшению противоизносных свойств дизельных топлив и показатели соответственно равны  $K_{0,2} \approx 181$  % и  $K_{0,5} \approx 162$  % [67].

Одновременно были проведены исследования кислотности данного дизельного топлива методом постепенного добавления раствора едкого кали известной концентрации к определенному количеству топлива до тех пор, пока все кислоты не будут нейтрализованы.

Эксперимент показал, что после ЭФВ на дизельное топливо происходит повышение кислотности топлива с 1,70 мг КОН/100 мл до 2,21 мг КОН/100 мл, т.е. содержание органических кислот в топливе увеличивается на 25...30 %. Это в свою очередь также приводит к уменьшению износа или повышению кислотности дизельного топлива в пределах допустимых стандартом, способствует улучшению его противоизносных свойств.

При ЭФВ (сигнал эмиссии) на дизельные топлива износ пары трения увеличивается на 10...15 %, т.е. противоизносные свойства дизельного топлива ухудшаются и показатель  $K_{Э} \approx 87...91$  %.

Результаты исследования противоизносных свойств реактивного и дизельного топлив показывают, что электрофизическое воздействие, с

получением сигнала абсорбции, на топлива приводит к снижению величины износа, а следовательно, к улучшению противоизносных свойств топлив.

Как уже было сказано электрофизическое воздействие на углеводородные топлива при повышении температуры топлива, способствует увеличению скорости окисления углеводородов, образованию смолистых соединений и других процессов, которые приводят к химическому изменению состава топлив. Все эти процессы происходят при активном взаимодействии диамагнитной среды и парамагнитного кислорода с образованием продуктов окисления. Продукты окисления по своей природе представляют поверхностно-активные вещества (ПАВ) и обладают смазывающим эффектом.

Кроме того, углеводороды, являющиеся носителями естественной присадки – молекулярного кислорода, активно участвующего в процессе граничного трения. Поэтому образование окисных пленок в зоне трения происходит как сопряженный процесс окисления металла и углеводородов. При этом важное значение имеют три фактора: окислительная активность среды, окисляемость углеводородов и условия переноса молекулярного кислорода к зонам трения. В результате можно сказать, что износ пары трения снижается из-за уменьшения концентрации растворенного кислорода расходуемого на окисление жидкой среды и возникновения граничных пленок из продуктов окисления.

Увеличение износа металла после ЭФВ с получением сигнала эмиссии, т.е. уменьшением "энергозапаса" углеводородной системы, объясняется, по-видимому, уменьшением окислительной активности углеводородной среды за счет изменения взаимодействия с парамагнитным кислородом и увеличением концентрации растворенного кислорода в зоне трения. Другими словами, при избытке кислорода в зоне трения процесс окисления металла идет до образования конечных продуктов. Толстые пленки смеси окислов обладают невысокой прочностью, они хрупки и

разрушаются под действием сил трения. В дальнейшем процесс окисления повторяется и наблюдается интенсивный износ и значительные колебания силы трения. В низкомолекулярных углеводородных жидкостях избыток кислорода в зоне трения приводит к ярко выраженному схватыванию (до 30% испытаний) трущихся поверхностей (рис. 4.6).

При изучении противоизносных свойств топлив и масел обнаружено явление, которое характеризуется "эффектом последствия", т.е. сохранением определенных свойств поверхностью, защищенной пленкой, металла в течение длительного времени после вывода топлива, подвергнутого ЭФВ, из системы.

"Эффект последствия" сохраняется длительное время, от нескольких дней до нескольких недель, выдерживает воздействие высоких температур до 773 К, электромагнитное излучение высокой частоты и действие различных растворителей.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что углеводородные топлива, подвергнутые электрофизическому воздействию обладают лучшими противоизносными свойствами.

При использовании электрофизического способа воздействия с получением сигнала абсорбции происходит более эффективное уменьшение износа стали ШХ15 в исследуемых топливах по сравнению с воздействием постоянного магнитного поля. Кроме того, максимальный эффект воздействия получается при максимальном сигнале ядерной абсорбции, который возможен только при резонансной частоте переменного электромагнитного поля.

Резонансная частота колебательного контура должна быть равна частоте прецессии ядер водорода в данном постоянном магнитном поле. Уход от резонансной частоты существенно снижает эффективность воздействия на углеводородные топлива, т.е. не происходит изменения заселенности спиновых уровней ядер за счет поглощения энергии

электромагнитного поля колебательного контура. Это говорит о качественном взаимодействии электрофизического воздействия с углеводородным веществом (рис. 4.7).

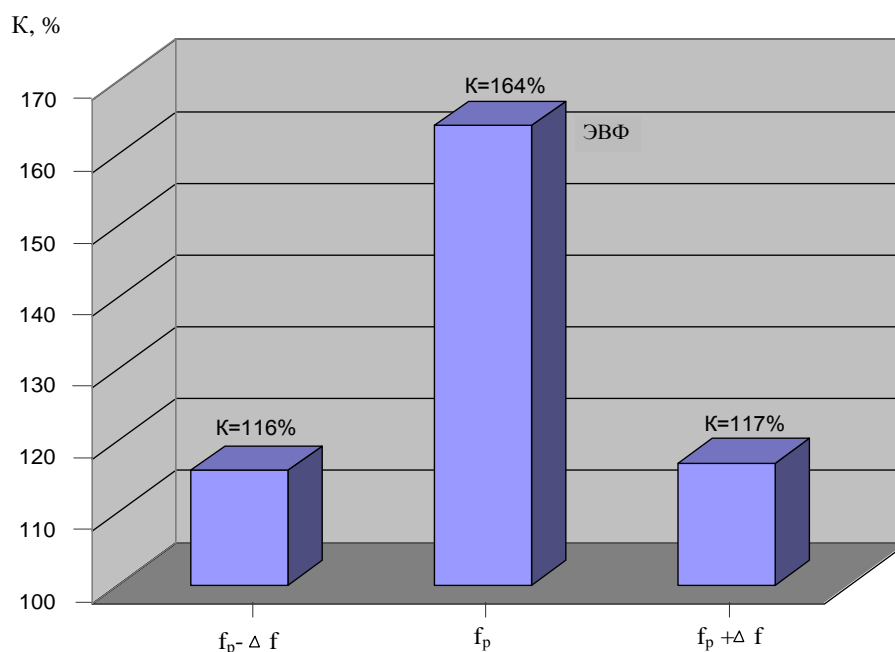


Рис. 4.7. Противозносные свойства топлива при уходе от резонансной частоты электрофизического воздействия.

#### 4.5.3. Противозносные свойства смазочного масла

Смазочная способность при граничном режиме смазки зависит от сложных физических и химических процессов, протекающих на поверхности раздела фаз твердое тело – смазочный материал. Она определяется образованием граничного слоя и взаимодействием активных компонентов смазки на поверхность металлов.

Противозносные свойства минерального масла МС-8п после ЭФВ исследовали на приборе в условиях трения скольжения. Режим работы прибора был следующим: скорость скольжения - 1,99 м/с, осевая нагрузка - 250Н, время эксперимента - 30 мин, температура в объеме масла - 293 К.

Исследования показали, что после воздействия на масло МС-8п постоянным магнитным полем износ пары трения из стали ШХ15 в условиях трения скольжения уменьшается в 2,0...2,5 раза ( $K_{\mu} \approx 244\%$ ). Воздействие на

масло электрофизическим способом воздействия приводит к уменьшению износа в 3,0...3,5 раза ( $K_{ЭФВ} \approx 423\%$ ) (рис. 4.8). Эти результаты подтверждают большую эффективность электрофизического воздействия на противоизносные свойства масла МС-8п, т.е. улучшения его способности предотвращать износ поверхностей трения в условиях устойчивой граничной пленки масла в области окислительного износа.

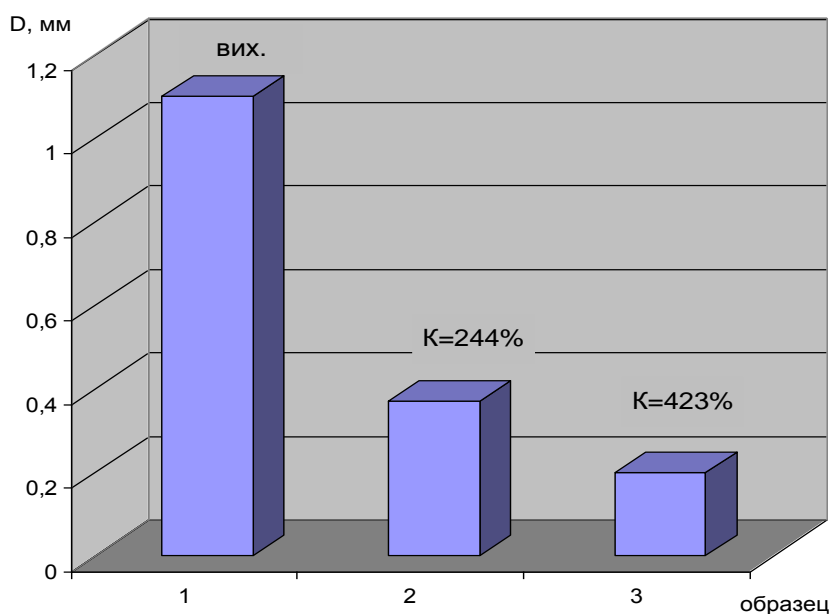


Рисунок 4.8 – Противоизносные свойства смазочного масла МС-8п

Одновременно с этим установлено увеличение осевой нагрузки схватывания на 20% и уменьшение температуры масла и образца на 25...30%. Отмечено уменьшение момента трения на 12...16%.

Электрофизическое воздействие энергетически способствует образованию поверхностно-активных веществ, которые обладают повышенной смазывающей способностью, т.е. ЭФВ в присутствии растворенного кислорода инициирует процессы на границе раздела металл – смазочная среда с образованием тонкопленочного объекта, способствующего снижению износа стали

#### 4.5.4. Износ $\alpha$ -железа при фреттинг-коррозии

Фреттинг-коррозия возникает на контактирующих металлических поверхностях при их относительном колебательном движении. Такое движение может вызываться вибрациями, возвратно-поступательным перемещением, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей и т.п. Относительное перемещение поверхностей может быть очень малым, тем не менее оно является одним из основных условий возникновения фреттинг-коррозии.

В условиях фреттинг-коррозии интенсивность разрушения контактирующих металлов зависит от их электрохимических характеристик, а также от наличия во внешней среде компонентов, влияющих на кинетику электрохимических процессов, в частности, кислорода воздуха, находящегося в масле. При фреттинг-коррозии существенную роль играет электрохимический фактор, что связано с появлением в зоне трения окислов в высокодисперсном состоянии, способных активно адсорбировать и удерживать на своей поверхности кислород воздуха.

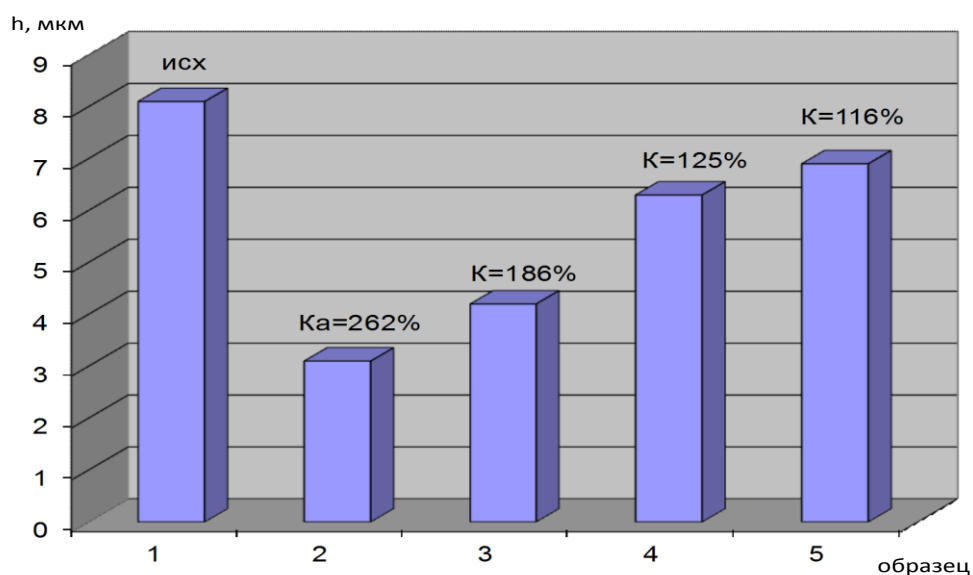
В настоящее время применяемые масла и смазки, хотя в большой степени и снижают износ в условиях фреттинг-коррозии, однако не обеспечивают полного его предотвращения.

Были апробированы способы борьбы с фреттинг-коррозией: воздействие постоянного магнитного поля и электрофизического способа на масло МС-8п. Испытания проводили на устройстве МФК-1 со следующими параметрами нагружения: амплитуда  $A = 100$  мкм, удельная нагрузка  $P = 100$  кг/см, частота вибраций равна 30 Гц, число циклов испытаний  $5 \cdot 10^5$ . Испытуемым образцом было  $\alpha$ -железо в паре со сталью 45 закаленной (HRC=48-50). Исследовали кольцевой контакт при тангенциальном колебательном движении, торца втулки (подвижный образец из стали 45) относительно торца неподвижного цилиндра, площадь контакта образцов  $0,5$  см<sup>2</sup>. Зона контакта образцов находилась в

специально сконструированной камере, которую перед каждым экспериментом заполняли испытуемым маслом.

Испытывали как исходное масло, так и масло сразу после магнитного воздействия, а также с выдержкой после воздействия  $t_B = 24$  часа и  $t_B = 48$  часов.

Проведенные сопоставления (рис. 4.9) средней глубины максимальных повреждений и величины износа при фреттинг-коррозии исследованных образцов после воздействия постоянного магнитного поля напряженностью 340 кА/м на масло МС-8п позволило заключить, что износ  $\alpha$ -железа при фреттинг-коррозии снижается в 1,8...2,0 раза. Проведение испытаний через 24 и 48 часов после воздействия магнитного поля приводит к уменьшению влияния воздействия и износ контактирующих деталей уменьшается только на 20...22 % и 14...16 % соответственно.



Рисунок

Рис. 4.9. Износ  $\alpha$ -железа при фреттинг-коррозии

Воздействие электрофизического способа, при получении наибольшей инверсии ядер водорода при абсорбции высокочастотной электромагнитной энергии из колебательного контура в постоянном неоднородном магнитном поле показало, что износ  $\alpha$ -железа в условиях фреттинг-коррозии уменьшается в 2,6...2,8 раза.



Уменьшение влияния фреттинг-коррозии при электрофизическом воздействии на масло МС-8п оказалось более эффективным по сравнению с магнитным полем. Установленный эффект уменьшения интенсивности фреттингового износа стали в среде углеводородного масла после электрофизического воздействия обусловлен, уменьшением поступления кислорода в зону контакта за счет образования граничной пленки, обладающей более высокой прочностью и большей склонностью к адгезии с поверхностью металла. Это подтверждается также результатами определения коэффициента трения, который для исходного масла составил  $K_{mp} = 0,52$  и для масла после электрофизического воздействия –  $K_{mp} = 0,31$ , т.е. уменьшается на ~ 40%.

Таким образом, воздействие на масло МС-8п электрофизическими методами создает условие для уменьшения возникновения между контактирующими поверхностями своеобразной реакционной электролитической среды, которая способствует увеличению скорости развития фреттинг-коррозии.

#### **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4**

1. Проведённые исследования по определению влияния ЭФВ на характеристики процесса сгорания углеводородных топлив указывают на увеличение полноты сгорания.

2. Стендовые и эксплуатационные испытания тепловых двигателей различных транспортных средств доказали, что ЭФВ на топливо приводит к улучшению экономических и экологических характеристик работы двигателей.

3. Результаты исследований противоизносных свойств топлив и масел при различных видах электрофизического воздействия показывает, что при ЭФВ происходит улучшение противоизносных свойств. Также обнаружено явление, которое характеризуется "эффектом последствия", т.е. сохранением определённых свойств поверхностью трения.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе поставлена и решена научно-практическая задача, направленная на усовершенствование процессов в камере сгорания тепловых двигателей путем электрофизического воздействия на углеводородное топливо. Решение данной задачи позволило получить следующие результаты:

1. Анализ перспектив развития и усовершенствование камер сгорания тепловых двигателей, а также результатов теоретических и экспериментальных исследований показал, что для решения задачи улучшения топливной эффективности двигателей целесообразно усовершенствование процессов в камерах сгорания путем влияния на углеводородное топливо, которое применяется в тепловых двигателях.

2. Результаты теоретически-экспериментальных исследований показали эффективность применения электрофизического воздействия на углеводородное топливо, которое приводит к улучшения параметров и характеристик тепловых двигателей.

3. В работе разработана методика электрофизического воздействия на углеводородное топливо для оценки параметров и характеристик камер сгорания тепловых двигателей. Методика основывается на результатах теоретико-экспериментальных исследований одновременного влияния на топливо неоднородного постоянного магнитного поля и резонансного высокочастотного электромагнитного поля.

4. Разработано и исследовано устройство для электрофизического воздействия на углеводородное топливо. Результаты исследований показали, что амплитуда сигнала абсорбции зависит от величины переменного электромагнитного поля. Установлено, что существует оптимальное значение величины переменного электромагнитного поля, при котором наблюдается максимум амплитуды сигнала абсорбции и максимальное влияние на электрофизические параметры топлива.

5. Установлено, что электрофизического воздействия на углеводородное топливо повышает полноту сгорания топлива и снижает отложение нагара в камере сгорания газотурбинного двигателя на 20...25 %.

6. Результаты исследований показали, что после электрофизического воздействия на дизельное топливо происходит увеличение цетанового числа на 2,5...3,5 единицы, которые обеспечивает уменьшение периода задержки горения топлива и улучшение характеристик теплового двигателя.

7. Результаты стендовых исследований дизельного двигателя с применением электрофизического воздействия на дизельное топливо показали возможность уменьшения часового расхода топлива на 5...6 % и удельного расхода топлива на 1,5...2,5 %.

8. Определение экологических показателей двигателя внутреннего сгорания показало, что применение электрофизического воздействия на топливо позволяет снизить концентрацию оксида углерода на 0,64...0,7 %, концентрацию углеводородов на 25...35 % и концентрацию оксида азота на 12...16 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрагам А. Ядерный магнетизм / А. Абрагам. – М.: Иностранная литература, 1963. – 551 с.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
3. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости / А. Ф. Аксенов. – М.: Транспорт, 1965. – 271 с.
4. Аксенов А. Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях / А. Ф. Аксенов. – М.: Машиностроение, 1977. – 151 с.
5. Аксенов И. Я. Транспорт и охрана окружающей среды / И. Я. Аксенов, В. И. Аксанов. – М.: Транспорт, 1986. – 176 с.
6. Акт технических испытаний магнитного активатора топлива (АТМ) в лаборатории судовых энергетических установок и технической эксплуатации (СЕУ и ТЕ). Одесского национального морского университета. 07.09.2010 года; г. Одесса.
7. Алабин М. А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. / М. А. Алабин, Б. М. Кац, Ю. А. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1968. – 228 с.
8. Андриевский А. П. Влияние электромагнитной обработки топлива на формирование износостойкости пар трения / А. П. Андриевский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/5 (62). – С. 34-38.
9. Бакулин В. И. Энергоемкие горючие для авиационных ракетных двигателей / В. И. Бакулин, Н. Ф. Дубовкин, Л. С. Яновский, В. А. Сорокин. – М.: Физматлит, 2009. – 400 с.
10. Белоусов В. Н. Топливо и теория горения / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, О. С. Смирнова. – Санкт-Петербург.: С-ПГТУРП, 2011. – 84 с.
11. Белый О. В. Эффект изменения свойств углеводородных топлив под воздействием электрического поля / О. В. Белый, Ю. М. Искандеров, В. Г. Мурамович, С. А. Туев. // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред.

Успехи, проблемы, перспективы, 12-14 апреля 2010г.: сборник трудов всероссийской конференции приуроченной к 20-летию ИПРИМ. – М., 2016. – Т.2, С. 83 -94.

12. Бензини автомобільні. Технічні умови: ДСТУ ISO 4063-1:2001. – [Чинний від 2002-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2002 – 23 с. (Національний стандарт України).

13. Богородицкий Н. П. Теория диэлектриков: учебник [для студ. высш. учеб. завд.]. / Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Ворбьев, Б. М. Тареев. – М.: Энергия, 1965. – 341 с.

14. Большаков Г.Ф. Физико-химические основы применения мотрных, реативных и ракетных топлив / Г.Ф. Большаков, Е.И. Гулин, Н.Н. Торичнев. – М.: Химия, 1965. – 270 с.

15. Большаков Г. Ф. Гетероорганические соединения реактивных топлив / Г. Ф. Большаков, Е. А. Глебовская. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 185 с.

16. Большаков Г. Ф. Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах / Г. Ф. Большаков. – М.: Химия, 1972. – 232 с.

17. Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения / Ф. Вайнберг, Дж. Лаутон. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

18. Вильямс Ф. А. Теория горения/ Ф. А. Вильямс. – М.: Наука, 1971. – 616 с.

19. Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме / С. В. Вонсовский. – М.: Гостехиздат, 1953. – 440 с.

20. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

21. Вонсовский С. В. Магнетизм микрочастиц / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1973. – 279 с.

22. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул / Г. Герцберг. – М.: Иностранная литература, 1949. – 551 с.

23. Гинзбург Л. Г. Исследование влияния качества цилиндрического масла и его дозировки на износы ЦПГ СДВС при их эксплуатации на высокосернистых топливах: дисс. канд. техн. наук. / Гинзбург Лев Григорьевич. – Л., 1967. – 162 с

24. Гриневич Ф. Б. Трансформаторные измерительные мосты / Ф. Б. Гриневич, А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский, М. П. Цапенко. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
25. Гурвич И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин, В. И. Чумак. – М.: Транспорт, 1994. – 144 с.
26. Гуреев А. А. Химмотология / А. А. Гуреев, В. Л. Лашхи, И. Г. Фукс. – М.: Химия, 1986. – 368 с.
27. Гутаревич Ю. Ф. Екологія та автомобільний транспорт: навчальний посібник. / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун, А. О. Корпач, Л. П. Мержиєвська. – К.: Арістей, 2006. – 292 с.
28. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний: ГОСТ 18509-88. – [Действующий с 1990-01-01]. – М.: Межгосударственный стандарт, 1990 – 128 с.
29. Дорфман Я. Г. Диамагнетизм вещества / Я. Г. Дорфман. – М.: Физматлит, 1961. – 231 с.
30. Дорфман Я. Г. Магнитные свойства и строение вещества / Я. Г. Дорфман. – М.: ЛКИ, 2010. – 378 с.
31. Дятлов И. Н. Распыливание топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей / И. Н. Дятлов. – Казань.: КАИ, 1980. – 81 с.
32. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М. А. Ельяшевич. – М.: Эдиториал, 2001. – 896 с.
33. Егоров В. Н. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья 1968, №1
34. Ёсимура Кацуро. Эффективность устройств магнитной обработки, используемых для улучшения сгорания топлива / Ёсимура Кацуро // НЭНРЁ ОЁБИ НЭНСЁ. – 1982. – т. 49, №3. – С. 241 – 254.
35. Жерновой А. И. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / А. И. Жерновой, Ю. С. Егоров, Г. Д. Латышев. – Л.: Колос, 1981. – 295 с.

36. Зацепин Д. В. Окисление водорода в стехиометрической водородо-воздушной смеси и высокоскоростной волне ионизации / Д. В. Зацепин, С. М. Стариновская, А. Ю. Стариновский //Химическая физика. – 2001. – Т. 20, № 7. – С. 66 – 99.
37. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 158 с.
38. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
39. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. – М.: Академия наук, 1944. – 70 с.
40. Зрелов В. А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы / В. А. Зрелов. – М.: Машиностроение, 2005. – 280 с.
41. Зрелов В.Н. Реактивные двигатели и топливо / В. Н. Зрелов, В. А. Пискунов. – М.: Машиностроение, 1968. – 310 с.
42. Иванов В. Н. Экология и автомобилизация / В. Н. Иванов, В. К. Сторчевус. – К.: Будівельник, 1990. – 128 с.
43. Каган Я. М. Лабораторные исследования и промышленные испытания влияния переменного электромагнитного поля на образование смоло-парафиновых отложений / Я. М. Каган, В. Я. Мягков. – М.: Недра, 1965. – 82 с.
44. Казанджан П. К. Теория авиационных двигателей / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, В. Т. Шулекин. – М.: Транспорт, 2000. – 280 с.
45. Карандеев К. Б. Мостовые методы измерений / К. Б. Карандеев. – К.: Гостехиздат, 1958. – 247 с.
46. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
47. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

48. Кузнецов Н. М. Кинетика молекулярных реакций / Н. М. Кузнецов. – М.: Наука, 1982. – 221 с.
49. Кубарев С. И. О возможности влияния магнитного поля на скорость жидкофазного окисления углеводородов / С. И. Кубарев, Е. А. Пшеничнов, А. С. Шустов // Всесоюзная конференция «Поляризация ядер и электронов и эффекты магнитного поля в химических реакциях: тезисы докладов. – Новосибирск, 1975.
50. Кубарев С. И. Влияние магнитного поля на скорость фотоокисления некоторых кристаллических ароматических углеводородов / С. И. Кубарев, Е. А. Пшеничнов, А. С. Шустов // ДАН. – М, 1972. – Т. 204. – №2. – С. 376-380.
51. Кюрегян С. К. Эмиссионный спектральный анализ нефтепродуктов / С. К. Кюрегян. – М.: Химия, 1969. – 296 с.
52. Лефевр А. Процессы в камере сгорания ГТД / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
53. Литвинов Ю. А. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей / Ю. А. Литвинов, В. О. Боровик. – М.: Машиностроение, 1995. – 395 с.
54. Лиханов В. А., Деветьяров Р. Р. Испытания двигателей внутреннего сгорания и топливной аппаратуры дизелей: учебное пособие / В. А. Лиханов, Р. Р. Деветьяров – 3-е изд., испр. и доп. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 106 с.
55. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Экологическая безопасность: Учебное пособие / В. А. Лиханов, О. П. Лопатин. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 126 с.
56. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
57. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник [для студ. высш. учеб. завд.] / В. Н. Луканин, К. А. Морозов. – М.: Высш. шк., 1995 – 369 с.
58. Малиновский А. Э. Влияние переменного электрического поля высокой частоты на скорость горения газа / А. Э. Малиновский, В. С. Россыхин, В. П.



Тимковский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1934 – Т.4, Вып. 2. – С. 182-188.

59. Малыгин Б. В., Погорлецкий Д. С., Васильченко Г. Ю., Сапронов А. А. Методы повышения экологической безопасности в процессе магнитной обработки углеводородных топлив для двигателей внутреннего сгорания / Б. В. Малыгин, Д. С. Погорлецкий, Г. Ю. Васильченко, А. А. Сапронов // Науковий вісник Херсонського державного морського інституту. – 2011. – №2(5). – С. 130-139.

60. Масленников М. М. Авиационные газотурбинные двигатели / М. М. Масленников, Ю. Н. Шальман – М.: Машиностроение, 1975. – 576 с.

61. Масло авиационное МС-8П. Технические условия: ГОСТ 38 101163-78.– [Действующий с 2013-01-01]. – М. : Межгосударственный стандарт, 2015 – 14 с.

62. Морозова І. В. Спосіб і пристрій для підвищення економічних і екологічних показників роботи двигуна внутрішнього згорання / В. І. Морозов, І. В. Морозова // Вісник центрального наукового центру транспортної академії України «Автошляховик України». – 2010. – № 13. – С. 58-60.

63. Морозова І. В. Підвищення ефективності контролю діелектричних властивостей нафтопродуктів / І. В. Морозова // Електроніка та системи управління. – 2010. – № 3(25). – С. 40-43.

64. Морозова І. В. Контроль качества углеводородных жидкостей путем определения электрофизических свойств / И. В. Морозова, В. М. Землянский, С. Ю. Кравченко, В. И. Морозов // Віснику інженерної академії України. – 2011. – № 2. – С. 197-202.

65. Морозова І. В. Аналіз динаміки електрофізичного впливу на вуглеводневі рідини / І. В. Морозова, В. І. Морозов, О. Б. Іванець // Нафтова і газова промисловість. – 2012. – №1. – С. 45-47.

66. Морозова І. В. Поліпшення експлуатаційних показників теплових двигунів за допомогою електрофізичного впливу на паливо / В. І. Морозов, Ю. М. Терещенко, І. В. Морозова // Наукоємні технології». – 2016. – № 1 (29). – С. 102-106.

67. Морозова І. В. Вплив елетрофізичної дії на протизношувальні властивості пально-мастильних матеріалів теплових двигунів / Ю. М. Терещенко, І. В. Морозова // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 2 (71). – С. 50-55.

68. Morozova I. V. Change of heat engine performance by electro-physical influence on fuel / I. V. Morozova, Yu. M. Tereschenko, S. L. Maksimov // The advanced science journal. – ISSUE 02 / VOLUME 2016 /ISSN 2219-746X. – Page 45-49.

69. Морозова И. В. Современный способ повышения эффективности камер сгорания тепловых двигателей / В. И. Морозов, Ю. М. Терещенко, И. В. Морозова // Евразийский союз ученых. – 2012. – Часть 2, №7 (28). – С. 29-31.

70. Морозова И. В. Повышение надёжности, экономичности и снижение токсичности работы двигателей внутреннего сгорания / И. В. Морозова, В. И. Морозов // АВІА-2003: V міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2003 р.: матеріали наук.-техн. конф. – К. : НАУ, 2003. – Т.ІІІ. – С. 18.14-18.17.

71. Морозова И. В. Влияние электрофизического воздействия на экономические и экологические показатели работы ДВС / И. В. Морозова, В. И. Морозов, Е. К. Мартыничук // Проблеми хіммотології: II міжнародна науково-технічна конференція, 2-6 червня 2008 р.: тези доп. – К. : НАУ, 2008. – С. 88-89

72. Морозова И. В. Результаты испытания устройства электрофизического воздействия на дизельное топливо / И. В. Морозова, В. И. Морозов // АВІА-2009 АВІА-2009: IX міжнародна науково-технічна конференція, 21-23 вересня 2009 р.: матеріали наук.-техн. конф. – К. : НАУ, 2009. – Т.ІІІ. – С. 18.37-18.41.

73. Морозова И. В. Исследование магнитной восприимчивости углеводородных сред при электрофизическом воздействии. / И. В. Морозова, В. И. Морозов // АВІА-2011: X міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: стаття – К. : НАУ, 2011. – Т.ІІІ. – С. 18.29-18.33.

74. Морозова И. В. Повышение эксплуатационных показателей работы двигателя внутреннего сгорания / И. В. Морозова, В. И. Морозов // Ключевые аспекты научной деятельности: VIII Международная научно-практическая конференция, 15-22

вересня 2012 р.: матеріали науч.-техн. конф. – Польща: Sp. zo. o. «Nauka I studia», 2012. – [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru.htm](http://www.rusnauka.com/Page_ru.htm).

75. Морозова І. В. Вплив подвійного ядерного резонансу на енергетичні властивості пально-мастильних матеріалів / І. В. Морозова, В. І. Морозов // АВІА-2013: Х міжнародна науково-технічна конференція, 21-23 травня 2013 р.: матеріали наук.-техн. конф. – К. : НАУ, 2013. – Т. V. – С. 13.103-13.106.

76. Морозова І. В. Удосконалення процесів в камері згоряння газотурбінних двигунів шляхом електрофізичного впливу на паливо. / І. В. Морозова, Ю. М. Терещенко // Політ. Сучасні проблеми науки.: ХVІ Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 7 квітня 2016 р.: тези доп. – К. : НАУ, 2016. – С. 107.

77. Морозова І. В. Современный способ повышения эффективности камер сгорания тепловых двигателей / В. И. Морозов, Ю. М. Терещенко, И. В. Морозова // Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения: ХХVІ Международная научно-практическая конференция, 28 липня 2016 р.: матеріали науч.-техн. конф. – Россия: «ЕСУ», 2016. – С. 29-31.

78. Мурамович В. Г. О взаимодействии электрических полей с углеводородами / В. Г. Мурамович // Транспорт России: проблемы и перспективы 2011, 22-23 ноября 2011 г.: труды Всероссийской научно-практической конференции – М. : Транспорт России, 2011. – Т. 1. – С. 107 – 112.

79. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа: ГОСТ 5985-79.– [Действующий с 1980-01-01]. – М.: Межгосударственный стандарт, 2009 – 8 с.

80. Нефтепродукты. Определение коксумности методом Конрадсона: ГОСТ 19932-99.– [Действующий с 2001-01-01]. – М. : Межгосударственный стандарт, 2009 – 8 с.

81. Нечаев Ю. Н. Теория авиационных двигателей: [учеб. для вузов ВВС]: Ч. 1 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский; под ред. Ю. Н. Нечаева. – М.: ВВИА им., проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 366 с.

82. Нечаев Ю. Н. Теория авиационных двигателей: [учеб. для вузов ВВС]: Ч. 2 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский; под ред. Ю. Н. Нечаева. – М.: ВВИА им., проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 448 с.

83. Пат. 45574 Україна, МПК G01N 99/00. Спосіб зберігання і збільшення тривалості індукційного періоду окиснення вуглеводневих рідин (бензинів) / Бойченко С. В., Морозова І. В., Степенко О. О., Черняк Л. М.; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200912042; заявл. 24.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. №8 – 6 с.

84. Пат. 107241 Україна, МПК C10G 32/00. Спосіб підвищення детонаційної стійкості вуглеводневих рідин (бензинів) / Дмитрієв М. М., Морозов В. І., Рутковська І. А., Морозова І. В., Марчук В. Є.; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. – №a201301521; заявл. 08.02.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №23. – 6 с.

85. Паливо для реактивних двигунів РТ. Технічні умови: ГСТУ 320.00149943.007-2:97.– [Чинний від 1998-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2002 – 11 с. (Національний стандарт України).

86. Паливо ТС-1 для реактивних двигунів. Технічні умови: ГСТУ 320.00149943.011-1:99 .– [Чинний від 1999-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2002 – 12 с. (Національний стандарт України).

87. Папок К. К. Химмотология топлив и смазочных масел / К. К. Папок. – М.: Врениздат, 1981 – 192 с.

88. Пискунов В. А. Испытания топлив для авиационных реактивных двигателей / В. А. Пискунов, В. Н. Зрелов – М.: Машиностроение, 1974. – 198 с.

89. Погорлецкий Д. С. Перспективы магнитной обработки углеводородных топлив на автотранспорте / Д. С. Погорлецкий, А. Б. Малыгин, А. В. Котыло // Науковій вісник Херсонського державного морського інституту. – 2013. – №3. – С. 58-66.

90. Покровский Г. П. Топливо, смазочные материалы и охлаждающие жидкости / Г. П. Покровский. – М.: Машиностроение, 1985. – 194 с.

91. Поляцко В. Л. Экспериментальные исследования влияния магнитного поля на экологические показатели автомобильного двигателя / В. Л. Поляцко, В. С. Морозова, В. С. Гун // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2010. – №15 (186). – С. 83-89.
92. Пономарёв Т. А. Настоящее и будущее авиационных двигателей / Т. А. Пономарёв. – М.: Воениздат, 1982. – 236 с.
93. Приложение 16. Охрана окружающей среды. Т. II. Эмиссия авиационных двигателей. – 3-е изд. – Монреаль: Международная организация гражданской авиации. 2008. – 118 с.
94. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинные двигатели / Ю. М. Пчелкин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
95. Саблина З. А. Состав и химическая стабильность моторных топлив / З. А. Саблина. – М.: Химия, 1972. – 277 с.
96. Свиридов Ю. Б. Улучшение топливной экономичности, снижения дымности и токсичности отработавших газов автотракторных двигателей / Ю. Б. Свиридов. – Л.: НПО. ЦНИТА, 1985. – 258 с.
97. Сельвуд П. Магнитохимия / П. Сельвуд. – М.: Иностранная литература, 1958. – 458 с.
98. Скребков О. В. Колебательная неравновесность и электронное возбуждение в реакции водорода с кислородом за ударной волной / О. В. Скребков, С. П. Каркач. // Кинетика и катализ – 2007. – Т. 48, № 3. С. 388 – 396.
99. Смирнов В. В. Интенсификация горения водородно-кислородных смесей в дозвуковом потоке при возбуждении молекул  $O_2$  электрическим разрядом / В. В. Смирнов, А. М. Старин, О. М. Стельмах // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 424, № 6. С. 760 – 764.
100. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения / Д. Б. Сполдинг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 320 с.
101. Старин А. М. О кинетики инициирования детонации в сверхзвуковом потоке смеси  $H_2+O_2$  (воздух) при возбуждении молекул  $O_2$  резонансным лазерным

излучением / А. М. Старин, Н. С. Титова //Кинетика и катализ – 2003. – Т. 44, № 1. С. 35 – 46.

102. Сторожук Я. П. Камеры сгорания стационарных газотурбинных и парогазовых установок / Я. П. Сторожук. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

103. Татевский В. М. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов / В. М. Татевский. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 412 с.

104. Теоретические основы химмотологии: под ред А. А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.

105. Теория авиационных газотурбинных двигателей: учебник / [Ю. М. Терещенко, Л. Г. Бойко, Л. Г. Волянская и др.]; под ред. Ю. М. Терещенко. – К.: НАУ, 2013. – 596 с.

106. Теория двигателей внутреннего сгорания: под ред. Н. Х. Дьяченко. – Л.: Машиностроение, 1974. – 560 с.

107. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей: под ред. С. С. Наметкина, С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

108. Теорія теплових двигунів. Газодинамічний розрахунок елементів газотурбінних двигунів: навч. Посібник / [Терещенко Ю. М., Кулик М. С., Мітрахович М. М. та ін]; за ред. Ю. М. Терещенка. – К.: НАУ, 2015. – 292 с.

109. Топлива дизельные. Метод определения цетанового числа: ГОСТ 3122-67.– [Действующий с 1968-01-01]. – М. : Межгосударственный стандарт, 1998 – 11 с.

110. Топливо моторное. Метод определения фактических смол (по Бударову): ГОСТ 8489-85.– [Действующий с 1986-07-01]. – М. : Межгосударственный стандарт, 2001 – 4 с.

111. Топлива термостабильные Т-6 и Т-8В для реактивных двигателей. Технические условия: ГОСТ 12308-89.– [Действующий с 1990-07-01]. – М. : Межгосударственный стандарт, 2012 – 6 с.

112. Травкин М. П. Жизнь и магнитное поле / М. П. Травкин. – Белгород.: Белгородский институт, 1971. – 193 с.

113. Третьяков И. Г. Влияние магнитного поля на физико-химические свойства топлив/ И. Г. Третьяков, В. А. Баленко: Электронная обработка материалов. – 1990, №1. – С. 28-29.
114. Усатенко С. Т. Оценка эффективности электрофизической обработки топлив / С. Т. Усатенко, И. Г. Третьяков: Эксплуатационные свойства авиационных топлив – К.: Химия, 1972, вып. 3, ч.1, с. 99–101.
115. Файнлейб Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справочник / Б. Н. Файнлейб. – Л.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
116. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник. Том 1. Динамика физико-химических процессов в газе и плазме: под ред. Г. Г. Черного, С. А. Лосева. – М.: МГУ, 1995. – 350 с.
117. Химмотология ракетных и реактивных топлив: под ред А. А. Браткова. – М.: Химия, 1987. – 304 с.
118. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны / А. Р. Хиппель. – М.: Иностранная литература, 1960. – 438 с.
119. Ховах М. С. Автомобильные двигатели / Архангельский В. М., Вихерт М. М., Воинов А. Н., Степанов Ю. А., Трусков В. И., Ховах М. С. – М.: Машиностроение, 1977. – 590 с.
120. Христич В. А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / В. А. Христич, А. Г. Тумановский. – К.: Техника, 1983. – 144 с.
121. Хун. Диффузионная модель точного расчета выбросов  $NO_x$  из камеры сгорания газотурбинного двигателя, работающего на азотосодержащем топливе / Хун // Энергетические машины и установки. – 1976. – № 3. С. 23-30.
122. Частухин В. И. Топливо и теория горения / В. И. Частухин, В. В. Частухин. – К.: Вища школа, 1989. – 223 с.
123. Чертков Я. Б. Применение реактивных топлив в авиации / Я. Б. Чертков, В. Г. Спирткин. – М.: Транспорт, 1974. – 160 с.

124. Чечерников В. И. Магнитные измерения / В. И. Чечерников. – М.: МГУ, 1963. – 280 с.
125. Чёрный Г. Г. Газовая динамика / Г. Г. Чёрный – М.: Наука, 1988. – 424 с.
126. Чичинадзе А. В. Трение, износ и смазка / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
127. Шепель А. Я. Влияние ультрафиолетового излучения на некоторые эксплуатационные свойства топлив / А.Я. Шепель, А. А. Литвинов, В. Н. Турчак: Эксплуатационные свойства авиационных топлив 1972, вып. 3, ч.1. С. 51-52.
128. Штода А. В. Конструкция авиационных двигателей / А. В. Штода. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
129. Шляхтенко С. М. Тория воздушно-реактивных двигателей / С. М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
130. Эльпинер И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И. Е. Эльпинер. – М.: Физматгиз, 1963. – 420 с.
131. Эндрю Э. Р. Ядерный магнитный резонанс / Э. Р. Эндрю. – М.: Иностранная литература, 1957. – 299 с.
132. Belousow W, Krimmling J, Oelker J. Matherielle und mathematische Modellierung von Feuerraum- und Flammenströmungen in Hinblick auf die Verbrennung von Problemkohlen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, Heft 2, 1990.
133. Guo H., Liu Z., Chen Y., Yao R.A Study of Magnetic effects on the Physicochemical Properties of Individual Hydrocarbons Logistical Engineering College, Chongqing 400042, P.R China(1994), pp.216-220.
134. Introduction to the Magnetic Treatment of Fuel. <http://www.magnetizer.com/tech9.html#top>
135. Magnetic Treatment of Diesel Fuel By Wouter Lisseveld. <http://www.algae-x.net/marketing/whitepapers/magnetic-treatment-of-diesel-fuel>
136. Magnetic Treatment of Fuel., <http://www.magneticast.com/eng/energy/fuelModify.asp>



137. Mike R. Powell. Magnetic Water and Fuel Treatment: Myth, Magic, or Mainstream Science. Volume 22.1, January / February 1998.
138. Mathur M. L., Maccalum N.R.L/ Swirling air jets issuing from vane swirlers. Part 1: free jets. Journal of the institute of fuel, (214).
139. Rajan Garg, Ajay Kumar Agarwal, 'Fuel Energizer: The Magnetizer (A Concept of Liquid Engineering)', IJIRD. April, 2013 Vol 2 Issue 4.
140. Richard Kunz, chemist. Magnetic Treatment of Fuel. [http://www.probonoscience.org/pennysolutions/recipes/automobile/buyer\\_beware/magnetic\\_fuel\\_treatment.htm](http://www.probonoscience.org/pennysolutions/recipes/automobile/buyer_beware/magnetic_fuel_treatment.htm)
141. Shweta Jain, Prof. Dr. Suhas Deshmukh, Experimental Investigation of Magnetic Fuel Conditioner (M.F.C) in I.C. engine' IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) ISSN: 2250-3021 Volume 2, Issue 7(July 2012), P 27-31.
142. Super Fuel Max FAQ. <http://www.o-fuel.ru/faq.html>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ



# ПАТЕНТ

## НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 49402

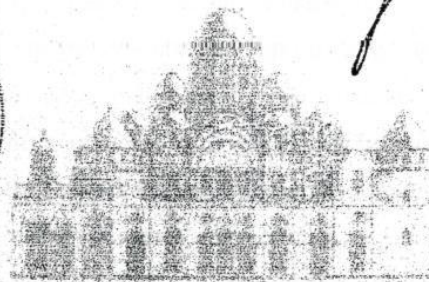
### СПОСІБ ЗБЕРІГАННЯ І ЗБІЛЬШЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО ПЕРІОДУ ОКИСНЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ РІДИН (БЕНЗИНІВ)

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.04.2010.**

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності

М.В. Паладій





УКРАЇНА



# ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

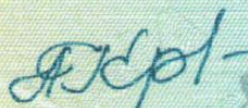
№ 107241

**СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ДЕТОНАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ  
ВУГЛЕВОДНЕВИХ РІДИН (БЕНЗИНІВ)**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи  
**10.12.2014.**

Голова Державної служби  
інтелектуальної власності України

 А.Г. Жарінова







**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор Національного авіаційного університету з наукової роботи

В. П. Харченко

“ ” 2016 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Генеральный директор  
ООО «АвтоБизнесЦентр»



Тимош В.С.

2016 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів науково-дослідної роботи**

Ми, що нижче підписалися технічний директор ООО АвтоБизнесЦентр Мешков А.А., науковий керівник Національного авіаційного університету д.т.н., професор Терещенко Ю.М., склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Морозової Ірини Володимирівни “Удосконалення процесів в камері згорання теплових двигунів шляхом електрофізичного впливу на вуглеводневе паливо” використовуються у експлуатаційному процесі на автомобілях Chrysler, Jeep, Toyota, Subaru.

Найменування введеного результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Спосіб і пристрій електрофізичної дії на паливо та мастило, з метою покращення експлуатаційних властивостей, призначені для експлуатації двигуна внутрішнього згорання.	Спосіб і пристрій електрофізичного впливу на паливо та мастило дозволяє підвищити ефективність, економічність, екологічність та довговічність двигуна внутрішнього згорання.

Д.т.н. професор кафедри АД НАУ

Ю.М. Терещенко


Технічний директор  
ООО АвтоБизнесЦентру



Мешков А. А.




**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Проректор Національного авіаційного  
університету з наукової роботи

 В. П. Харченко

“ ” 2016 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Генеральний директор  
ТОВ «АвтоімпорТС»



 М.А. Зарицький

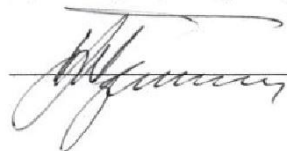
2016 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися технічний директор ТОВ «АвтоімпорТС» *Єфіміщ В.І.*, науковий керівник Національного авіаційного університету *д.т.н., професор Терещенко Ю.М.*, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Морозової Ірини Володимирівни “Удосконалення процесів в камері згоряння теплових двигунів шляхом електрофізичного впливу на вуглеводневе паливо” використовуються у експлуатаційному процесі на автомобілях Land Rover, Range Rover, Jaguar.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Спосіб і пристрій електрофізичної дії на паливо, з метою покращення експлуатаційних властивостей, призначені для експлуатації дизельного двигуна.	Спосіб і пристрій електрофізичного впливу на паливо та мастило дозволяє підвищити ефективність, економічність, екологічність та довговічність дизельного двигуна.


Д.т.н. професор кафедри АД НАУ



Ю.М. Терещенко

Технічний директор  
ТОВ «АвтоімпорТС»



 Єфіміщ В.І.





**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор Національного авіаційного  
університету з наукової роботи

\_\_\_\_\_ В. П. Харченко

“ ” \_\_\_\_\_ 2016 р.



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор Національного  
транспортного університету –  
проректор з наукової роботи

\_\_\_\_\_ М. М. Дмитрієв

\_\_\_\_\_ 2016 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів науково-дослідної роботи**

Ми, що нижче підписалися, *завідувач кафедри Національного транспортного університету Екології і безпеки життєдіяльності Хрутьба В.О., науковий керівник Національного авіаційного університету д.т.н., професор Терещенко Ю.М.,* склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Морозової Ірини Володимирівни “Удосконалення процесів в камері згоряння теплових двигунів шляхом електрофізичного впливу на вуглеводневе паливо” використовуються в науково-дослідній лабораторії кафедри Екології і безпеки життєдіяльності в якості стенду для дослідження впливу магнітною обробкою палива на експлуатаційні показники теплового двигуна.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Пристрій електрофізичного впливу на паливо з метою поліпшення експлуатаційних показників теплового двигуна.	Пристрій електрофізичного впливу на паливо дозволяє підвищити надійність, економічність і екологічність теплового двигуна

Д.т.н. професор кафедри АД НАУ

\_\_\_\_\_

Ю.М. Терещенко

Завідувач кафедри НТУ Екології і безпеки життєдіяльності

\_\_\_\_\_

Хрутьба В.О.