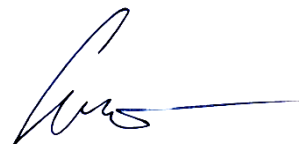


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П.А. Костычева»

На правах рукописи



СЛЮСАРЕВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ

**СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА АГРЕГАТОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
ОБРАБОТКОЙ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ**

Специальность 05.20.03 - Технологии и средства технического обслуживания в
сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Симдянкин Аркадий Анатольевич

Рязань 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования.....	12
1.1. Особенности эксплуатации дизельных двигателей мобильной сельхозтехники и методы снижения износа их агрегатов.....	12
1.2. Требования к моторным маслам и методы снижения износа смазываемых узлов введением в масло антифрикционных добавок.....	13
1.3. Методы снижения износа агрегатов ДВС, основанные на активации смазочных масел внешними энергетическими воздействиями.....	21
1.4. Цель и задачи исследований.....	39
Выводы по первой главе.....	40
Глава 2. Физические основы кавитации и построение качественной модели разрыва сплошности жидкости при акустической кавитации. Понятие износа узлов машин и методы его определения. Оценка износа пар трения по показателю фактора износа.....	42
2.1. Физические основы кавитации.....	42
2.2. Качественная модель разрыва сплошности жидкости и образования парогазовых пузырьков при акустической кавитации.....	46
2.3. Понятие износа узлов машин и методы его определения. Оценка износа пар трения по показателю фактора износа при трибологических испытаниях.....	57
2.4. Оценка влияния ультразвуковой кавитации в маслах на основные трибологические характеристики смазки и износ пар трения.....	61
Выводы по второй главе.....	65
Глава 3. Общая и частные методики исследований.....	66
3.1. Общая структура исследований.....	66

3.2. Методика выбора коэффициента поверхностного натяжения моторных масел критерием оценки изменения их трибологических свойств.....	67
3.3. Методика определения коэффициента поверхностного натяжения моторных масел.....	70
3.4. Методика определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры.....	76
3.5. Методика экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения масла, а также эффекта сохраняемости результатов ультразвукового воздействия на масло.....	77
3.6. Методика экспериментальной оценки эффективности кавитационного способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки.....	83
3.7 Методика эксперимента по определению зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке.....	85
3.8. Методика проведения триботехнических испытаний на машине трения при обработке моторного масла ультразвуком.....	87
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований.....	94
4.1. Результаты экспериментов по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры.....	94
4.2. Результаты экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры, коэффициента поверхностного натяжения моторного масла и кинематической вязкости.....	95
4.3. Результаты экспериментальной оценки эффективности способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки.....	102
4.4. Результаты триботехнических испытаний на машине трения при обработке моторного масла ультразвуком.....	105
Выводы по четвертой главе.....	113
Глава 5. Проверка предложенных решений и оценка их экономической эффективности.....	118

5.1. Стенд для ускоренных износных испытаний компрессоров.....	118
5.2. Результаты ускоренных износных испытаний компрессоров.....	127
5.3. Оценка экономической эффективности применения устройства периодической ультразвуковой обработки смазочных масел.....	128
Выводы по пятой главе.....	129
Заключение.....	130
Список литературы.....	133
Приложение.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Эффективность современного сельского хозяйства во многом зависит от характеристик используемой мобильной сельхозтехники. Основные технико-экономические и эксплуатационные характеристики современной сельхозтехники, такие как энергопотребление, КПД, надежность, ресурс безотказной работы, эффективность ремонта, экологическая чистота и др. в большой степени зависят от текущего состояния основных конструктивно - технологических узлов. В свою очередь, состояние конструктивно-технологических узлов техники определяется износом пар трения.

Наиболее остро вопрос износостойкости пар трения стоит в современных автотракторных двигателях, агрегаты которых работают в условиях высоких температур, значительного перепада внешних атмосферных условий, постоянной неравномерной вибрации, граничной смазки и пр., что резко снижает ресурс двигателей и повышает стоимость их обслуживания. Например, статистика показывает, что за время эксплуатации, тракторный двигатель ремонтируется до пяти раз. При этом отказы двигателей, впервые поступивших в ремонт, связаны, как правило, с изнашиванием и составляют 50...70% от их общего количества.

Таким образом, важной народнохозяйственной задачей является разработка и внедрение недорогих и эффективных способов снижения износа агрегатов двигателей мобильной сельскохозяйственной техники, что подтверждает актуальность данного направления научных исследований.

Степень разработанности. Изучением процессов и закономерностей износа и разработкой трибологических методов повышения износостойкости и долговечности узлов трения машин, в том числе агрегатов двигателей мобильной сельскохозяйственной техники, занимались: Ф.Н. Авдонькин, Н.В. Алдошин, В.А. Аметов, А.Г. Арженовский, Н.В. Бышов, С.М. Гайдар, Д.Н. Гаркунов, И.Г. Голубев, М.А. Григорьев, И.Б. Гурвич, И.К. Данилов,

С.Н. Девянин, А.С. Денисов, М.Н. Ерохин, Н.С. Ждановский, Б.П. Загородских, А.П. Иншаков, И.В. Крагельский, А.Т. Лебедев, В.П. Лялякин, А.В. Пыдрин, А.А. Симдянкин, И.А. Спицын, В.В. Стрельцов, А.П. Уханов, Д.А. Уханов, И.А. Успенский, А.В. Чичинадзе и др.

Обобщение и развитие результатов работ данных авторов является основой для создания оптимальных конструкций узлов трения, применения антифрикционных материалов, обработки трущихся поверхностей, нанесения на них специальных покрытий, применения смазочных масел с различными антифрикционными присадками, методов и устройств для внешних энергетических воздействий на смазку в узлах трения.

Проведенный в работе анализ известных методов и устройств для ультразвуковой обработки смазочных масел показал, что не проведена оценка влияния параметров ультразвука, вызывающего акустическую кавитацию, таких как: частота, мощность, время воздействия, а также расположение излучателя, на физико-механические и химические параметры смазки, не объяснена и физическая суть процесса снижения износа пар трения при обработке смазки ультразвуком, что говорит о своевременности и важности проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Работа выполнена по плану НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2016-2020гг. по теме 3 "Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве" в рамках раздела 3.3 "Повышение эффективности эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники за счет разработки новых конструкций, методов и средств технического обслуживания, ремонта и диагностирования".

Цель исследований – снижение износа агрегатов двигателей мобильной сельхозтехники при воздействии ультразвуковой обработки на смазочные масла.

Объект исследований - пары трения агрегатов дизельных двигателей мобильной сельхозтехники.

Предмет исследований – процесс ультразвуковой обработки моторного масла в системе смазки агрегатов дизельного двигателя и вызываемые ею изменения параметров изнашивания пар трения.

Научную новизну работы представляют:

- расчетно-экспериментальная зависимость показателя фактора износа пар трения от частоты ультразвука при ультразвуковой обработке синтетических моторных масел;
- результаты воздействия параметров ультразвукового излучения (частота, мощность ультразвука, время обработки) на физико-механические характеристики моторного масла (коэффициент поверхностного натяжения, температура, вязкость, эффект сохраняемости результатов ультразвуковой обработки);
- кавитационный способ получения и внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки.

Теоретическая значимость работы.

Проанализированы причины возникновения разрывов сплошности жидкости и возникновения парогазовых пузырьков при акустической кавитации; предложена интерпретация сил взаимодействия молекул в слоях жидкости в виде неразрывных "нитей", а сил взаимодействия молекул между слоями в виде встраиваемых "пружин", причем расстояние между слоями характеризует плотность, а жесткость "пружин" - кинетическая или динамическая вязкость ("нити" могут растягиваться, но не разрываться, а "пружины" - и растягиваться и разрываться); продемонстрирована зависимость коэффициента поверхностного натяжения от частоты и мощности источника волнового воздействия для синтетического, полусинтетического и минерального моторных масел.

Аналитические зависимости коэффициента поверхностного натяжения минеральных, полусинтетических и синтетических моторных масел от их температуры позволяют определять интервал температур в зоне контакта для

наиболее благоприятного проявления объемно-поверхностных свойств пленочных образований смазки.

Аналитическая зависимость коэффициента поверхностного натяжения синтетического моторного масла от частоты ультразвука позволяет прогнозировать вид зависимости фактора износа пар трения.

Практическая значимость работы.

Получены результаты триботехнических испытаний пар трения на машине трения СМТ-1М при обработке моторного масла ультразвуком. Предложено научно-обоснованное техническое решение, обеспечивающее снижение износа цилиндропоршневой группы компрессора А29.01.000 за счет периодической ультразвуковой обработки смазочного масла. Результаты износных испытаний компрессоров на стенде дают достоверную количественную оценку снижения фактора износа при ультразвуковой обработке моторного масла на 29,7%. Кроме того, разработанные рекомендации по применению устройства для периодической ультразвуковой обработки смазки могут быть использованы в учебном процессе при обучении студентов профильных направлений.

Методы исследований.

При проведении экспериментальных исследований использовались общие и частные методики исследования, в том числе и впервые разработанные. При проведении износных триботехнических испытаний на машине трения, использован ГОСТ 23.224-86 и методические указания РД 50-662-88.

Обработка результатов исследований проведена методами математической статистики с использованием современного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты оценки воздействия ультразвуковой кавитации (мощность, частота ультразвука и время обработки) на физико-механические характеристики моторных масел (коэффициент поверхностного

натяжения и время сохраняемости его изменения, температура, вязкость);

- результаты триботехнических износных испытаний на машине трения СМТ-1М образцов (ролик-колодка), при воздействии ультразвука на смазочное масло;
- конструкция устройства для периодической ультразвуковой обработки моторного масла и результаты ускоренных износных испытаний укомплектованных им компрессоров А29.01.000;
- оценка экономической эффективности внедрения прибора для периодической ультразвуковой обработки смазочного масла.

Достоверность результатов исследований.

Для осуществления экспериментальных исследований использовалось современное оборудование, прошедшее своевременную поверку. Полученные выводы подтверждаются сходимостью результатов теоретических исследований и полученных экспериментальных данных (расхождение не более 5%). При проведении экспериментальных исследований использовались современные методики, приборы и установки, пакеты прикладных программ. Результаты, полученные в ходе выполнения работы, согласуются с результатами, опубликованными в независимых источниках по тематике исследования, и прошли широкую апробацию в печати, на международных и всероссийских научно-практических конференциях, салонах и конкурсах.

Реализация результатов исследований.

Устройство для периодической ультразвуковой обработки моторного масла внедрено в качестве стенда для ускоренных износных испытаний компрессоров в ФГБОУ ВО РГАТУ.

Вклад автора в решение поставленных задач состоит в участии в формулировании цели, разработке и конкретизации задач работы, определении направлений и объема теоретических и экспериментальных

исследований, стендовых и производственных испытаний, а также в их организации и проведении.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований доложены и обсуждены на 68-ой Международной научно-практической конференции «Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве» (Рязань, 26 апреля 2017 г.), Международной научно - практической конференции "Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы" (Саранск, 19 октября 2018 г.), Международной научно - практической конференции " ПОЛИКОМТРИБ - 2019"(Гомель, 25-28 июня 2019г.), 2^й IAA/AASМеждународной конференции по космическим структурам и материалам. (Москва, 25-27 июня 2019г.), Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта РГАТУ "Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники" (Рязань 12 октября 2020 г.), на Национальной научно-практической конференции "Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса" (Рязань 20 ноября 2020 г.). Выполненный в рамках диссертационной работы проект "Способ внесения мелкодисперсных добавок в жидкости" (патент РФ на изобретение № 269013) получил Золотую медаль на XXIII Московском Международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед -2020» (Москва, 24-27 марта 2020 г.). Патент на изобретение РФ № 269013 награжден также дипломом Федеральной службы РФ по интеллектуальной собственности в номинации "100 лучших изобретений России за 2019г. и первое полугодие 2020г."

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в печати в 14 научных работах, из них 2 статьи в журналах, включенных в "Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук", 1 статья в базе Scopus, 1 статья

– в WoS, получен патент РФ на изобретение. Общий объем публикаций составил 5,12 пл., из них лично соискателю принадлежит 3,57 пл.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 167 наименований, в том числе 12 на иностранных языках, и 4 приложений, изложена на 176 страницах, включает 93 рисунка и 35 таблиц.

1. Состояние вопроса, цель и задачи исследований

1.1. Особенности эксплуатации дизельных двигателей мобильной сельхозтехники и методы снижения износа их агрегатов

Эксплуатация дизельных двигателей мобильной сельхозтехники сопряжена с неблагоприятными внешними условиями и повышенной нагрузкой при выполнении сельхозработ [11,31, 26,14,33].

На долговечность и износостойкость узлов двигателей влияет целый ряд внешних факторов, особенности конструкции, а также эффективность ремонтно-восстановительных работ и эксплуатационных мероприятий. [23, 24, 11, 20, 31, 135, 136, 14].

Современная трибология достигла больших успехов в вопросах изучения физико-механических аспектов трения, исследования поверхностей трения теоретическими и экспериментальными методами, расчетов и моделирования показателей износа, выработке научно обоснованных методов повышения износостойкости узлов трения [18, 64, 33, 134, 49, 19, 50, 21, 58, 30].

К классическим методам снижения износа пар трения и, в частности, трущихся деталей автотракторных двигателей, относится совершенствование их конструкции [111, 116, 99, 93, 32, 144], а также применение антифрикционных материалов [115, 85, 66, 55, 146]. Однако применение этих методов возможно лишь на стадии проектирования и изготовления и может существенно поднять стоимость конечного продукта. Следует также признать, что конструкция и технология изготовления современных двигателей доведены практически до совершенства, и их изменение не представляется актуальным и экономически обоснованным [110].

Более экономичными представляются методы, связанные с нанесением на поверхности пар трения различных антифрикционных покрытий и (или) их специальной обработкой. Данные мероприятия возможно проводить не только во время изготовления двигателей, но и при ремонте. [44, 1, 25, 94,

88, 84, 9, 10, 11, 59, 82, 109]. Проведенные испытания показали эффективность вышеназванных методов.

Детальный обзор и классификация существующих технологических методов снижения износа поверхностей деталей узлов трения приведен в работах [137, 11].

Широкое распространение получили эксплуатационно-технические методы снижения износа двигателей.

Эти методы основаны на: разработке и четком выполнении программ эксплуатационных мероприятий с учетом климатических и иных внешних условий эксплуатации техники; применении проактивного дистанционного управления комплексами сельхозмашин [106, 132, 139]; оптимальной эксплуатации системы смазки двигателя и его агрегатов [27, 79, 96, 97]; выборе научно обоснованной стратегии технического обслуживания и ремонта [57, 102] .

Снижению износа агрегатов двигателей способствует также применение экологически чистых ГСМ и, в частности, биотоплива [141, 152].

Важную роль в снижении износа агрегатов дизельных двигателей играет оптимизация режимов и сроков начальной и послеремонтной обкатки двигателей и применение эффективных способов и приборов контроля и прогнозирования процесса обкатки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [2, 133, 135].

1.2. Требования к моторным маслам и методы снижения износа смазываемых узлов путем введения в масла антифрикционных добавок

В настоящее время широко применяются безразборные методы снижения износа автотракторных ДВС, основанные на оптимизации смазочных (антифрикционных) свойств моторных масел

Моторное масло — это не только смазочный материал для поршневых двигателей внутреннего сгорания. Это важный элемент их конструкции. [5, 28, 153, 154, 155].

Современные моторные масла – это высоколегированные смазочные материалы очень сложного, тщательно разработанного и сбалансированного состава. Их основой являются минеральные, полусинтетические и синтетические базовые масла. Основные функциональные требования к моторным маслам:

- обеспечить чистоту деталей двигателя, за счет высоких моющих, диспергирующе-стабилизирующих и солюбилизирующих свойств по отношению к различным нерастворимым загрязнениям;
- способствовать легкому холодному пуску двигателя, обеспечивать хорошую прокачиваемость при холодном пуске и надежное смазывание в экстремальных условиях при высоких нагрузках и температуре окружающей среды за счет оптимальных вязкостно-температурных свойств и низкой температуры застывания;
- отводить тепло от нагретых деталей двигателя, обеспечивать надежную работу двигателя при высоких температурах в зоне цилиндропоршневой группы и в зоне картера за счет высокой термической и термоокислительной стабильности;
- обеспечивать надежную смазку деталей двигателя при любых режимах его работы за счет высоких антифрикционных, противоизносных и противозадирных свойств.
- обеспечивать нейтрализацию коррозионно-агрессивных компонентов, накапливающихся в процессе эксплуатации двигателя (продукты неполного сгорания топлива, а также воздействия кислорода воздуха и воды на материал деталей двигателя) за счет высоких антикоррозионных и защитных свойств.

При этом масла должны дополнительно обладать следующими свойствами: - стойкостью к старению; - высокой физической и химической стабильностью при транспортировании и хранении; - отсутствием коррозионного воздействия на материалы деталей двигателя, как в процессе работы, так и при длительных перерывах; - совместимостью с материалами

уплотнений и катализаторами системы нейтрализации отработавших газов; - малой летучестью, низким расходом на угар (экологичность); - малой вспениваемостью при высокой и низкой температурах; - энергосберегающими свойствами; - низкой токсичностью; - биоразлагаемостью [5, 104, 152, 64,28].

Для реализации всех вышеупомянутых свойств в базовую масляную основу добавляют присадки. Под "присадками" понимается маслорастворимые вещества или химические соединения. Они составляют самую распространенную группу добавок к маслам [11]. Практически все моторные масла выпускаются изготовителем с присадками [72]. Резкое увеличение числа автомобилей и автотракторной техники и жесткая конкурентная борьба между фирмами - производителями смазочных масел привело к тому, что ежегодно на рынке появляются десятки и сотни новых присадок и пакетов присадок. Беспристрастных и независимых сравнительных исследований эффективности присадок, естественно, не производится — это не выгодно производителям.

Присадки, применяемые для оптимизации трибологических свойств масел, по способу действия делятся на: -антифрикционные; - противоизносные; - противозадирные.

Противозадирные присадки используются, в основном, в трансмиссионных и промышленных маслах, а также в пластичных смазках [29, 13,164, 7].

Антифрикционные присадки разделяют на две группы: - маслорастворимые поверхностно-активные вещества (ПАВ); - твердые нерастворимые в масле вещества, как правило, неорганического происхождения, называют "антифрикционными добавками".

Антифрикционные добавки: дисульфид молибдена, графит, окись цинка, олово, кобальт, медь, в виде мелкодисперсных частиц добавляются в масло, образуя суспензию. Добавки обеспечивают антифрикционное и противоизносное, а, в некоторых случаях, и противозадирное действие.

Антифрикционные добавки используются в моторных маслах для снижения трения металлических пар поршней, стенок цилиндров [29, 72, 74, 48, 104, 91, 99].

Многочисленные химические методы получения ПАВ выходят за рамки диссертационной темы, поэтому в данном обзоре рассматриваются вопросы получения и внесения в масло антифрикционных добавок.

Для снижения износа агрегатов ДВС за счет улучшения антифрикционных и противозадирных свойств моторных масел широко используются способы и устройства для получения и внесения в исходное (базовое) масло дополнительных антифрикционных добавок (преимущественно мелкодисперсных частиц неорганического происхождения) [35, 90, 142, 95, 89, 86, 18].

Данные способы отличаются технологией получения и внесения в масло мелкодисперсных добавок.

Известен способ [87] получения присадок при помощи обработки твердых компонентов в специальном измельчающем устройстве с одновременной обработкой постоянным током (рис.1.1). После обработки, полученная масса сепарируется и добавляется к базовому маслу.

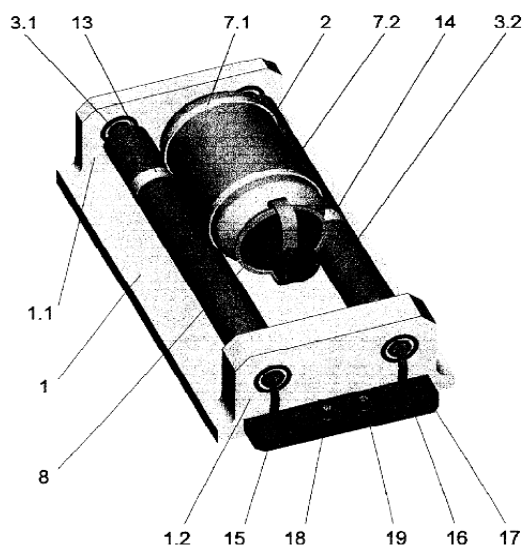


Рисунок 1.1 - Измельчающее устройство: 1,1.1,1.2–станина с опорами; 2-корпус; 3.1,3.2 – первый и второй валы с цапфами; 7.1,7.2 – первое и второе токосъемные кольца; 8- крышка; 13,14-токосъемные кольца на валах; 15,16 - скользящие контакты, 17- изоляционное основание; 18,19 - клеммы

К недостаткам способа следует отнести многоступенчатость процесса получения добавки, сложную конструкцию оборудования, и недостаточную стабильность полученного масла, обусловленную механическим дроблением частиц и перемешиванием взвеси.

Известен также способ [80] получения смазочного состава, с улучшенными антифрикционными свойствами, заключающийся в добавлении в смазочное масло дисперсионного порошка металла (меди), полученного методом электрического взрыва проводников в среде аргона или водорода. Функциональная схема установки для электрического взрыва проводников приведена на рис.1.2. Установка работает следующим образом. От высоковольтного источника питания заряжается емкостной накопитель энергии (C). Система подачи проволоки обеспечивает автоматическую подачу взрываемого отрезка проволоки в межэлектродный промежуток. При достижении проволокой высоковольтного электрода, системой управления автоматически включается разрядник, происходит разряд накопителя на отрезок проволоки между высоковольтным и заземленным электродами — и он взрывается. Образовавшийся порошок собирается в накопитель. Очищенный от порошка газ с помощью вентилятора через фильтр подается обратно в камеру.

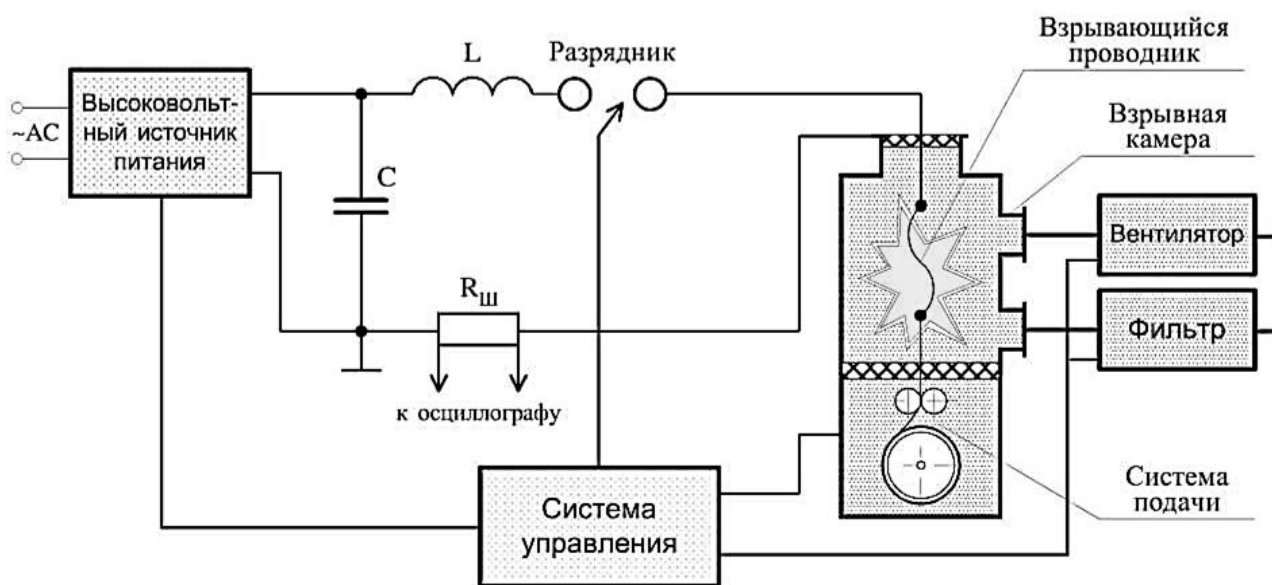


Рисунок 1.2. - Функциональная схема установки для электрического взрыва проводников

Получение однородной суспензии из базового масла и мелкодисперсионного порошка металла выполняется с помощью ультразвукового диспергатора УДЗН-2Т. Общий вид диспергатора представлен на рис. 1.3.

Применение эффективной технологии получения мелкодисперсного материала добавки позволяют получить масло с улучшенными трибологическими характеристиками. Недостатками данного способа являются многоступенчатость процесса, его сложность и высокая стоимость, обусловленные повышенными требованиями к обеспечению безопасности при практической реализации метода электрического взрыва проводников и сложной конструкцией применяемого оборудования. Также недостатком метода является невозможность получения дисперсного порошка из неметаллических материалов.

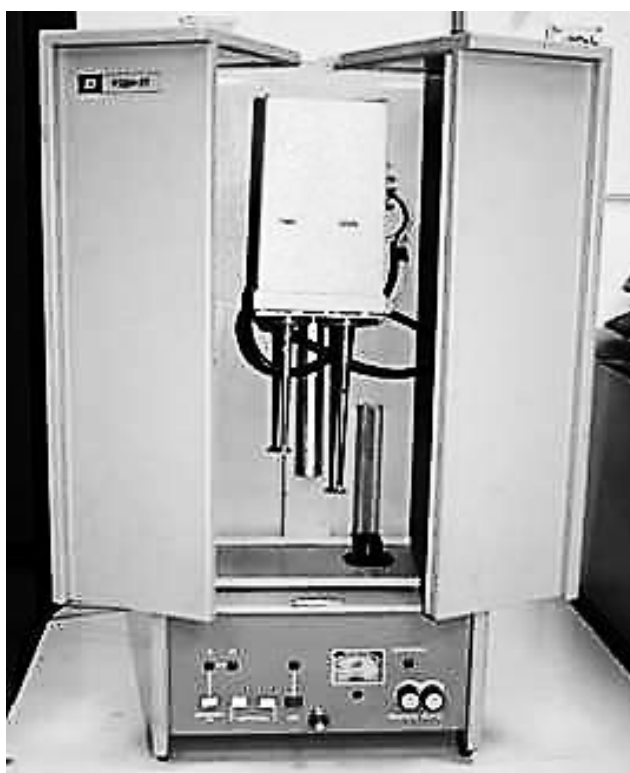


Рисунок 1.3 - Диспергатор УДЗН-2Т

В настоящее время разработан целый ряд методов создания ультрадисперсных и наноразмерных порошков [140].

Представляется перспективным способ получения модифицирующей металлосодержащей добавки для моторных масел, включающий добавление наноразмерного порошка, полученного испарением исходных веществ на ускорителе электронов (по методу ИЯФ СО РАН) [8] в базовое моторное масло и диспергирование его посредством ультразвуковых колебаний в режиме акустической кавитации, с применением ультразвуковой установки ИЛ 100/6. Общий вид установки представлен на рис. 1.4.

Для получения масла с добавкой в емкость с базовым маслом добавляется необходимое количество порошка, волновод полностью погружается в жидкость, включается генератор (на частоте 23 кГц.). Время воздействия ультразвука зависит от объема жидкости и концентрации порошка [100].



Рисунок 1.4 - Установка ИЛ 100/6: 1 - ультразвуковой генератор; 2 - магнитострикционный преобразователь; 3 - волноводы.

Положительный эффект данного способа заключается в том, что при обработке акустической кавитацией степень деагломерации частиц повышается, а скорость седиментации взвеси уменьшается. Таким образом, повышается качество и стабильность получаемого масла. Недостатком вышеизложенного способа является сложность и высокая стоимость, связанная с использованием громоздкого дорогого оборудования для получения наноразмерного порошка.

Анализ вышеуказанных разработок показал необходимость совершенствования и упрощения способов получения смазочных масел с мелкодисперсными добавками. Параллельно с решением основных задач диссертации, автор провел дополнительные исследования и предложил простой метод, основанный на ультразвуковой кавитации [101, 120].

Представляет определенный интерес, рассмотренный в работе [21] вопрос повышения послеремонтной долговечности автотракторных двигателей применением трибопрепаратов, добавляемых в моторное масло на время эксплуатационной обкатки и послеремонтной эксплуатации. Трибодобавки к моторным и другим маслам отличаются от многочисленных присадок в маслах тем, что присадки "работают" на масло, улучшая его эксплуатационные свойства, а триботехнические составы "работают" на металл, улучшая эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей, причем эти трибопрепараты не реагируют с маслами и не ухудшают их качество.

Разработан и обоснован метод выбора рациональных трибоматериалов для ускорения обкатки и повышения долговечности и безотказности ДВС после ремонта. Разработанный экспресс-метод и при использовании его в условиях ЦРМ СХП позволяет выявить рациональные трибопрепараты по отсутствию задира в паре трения и коэффициенту трения, который не должен превышать значения, равного 0,05.

В результате триботехнических исследований трибоматериалов, в составе моторного масла в условиях трения приближенных к условиям трения ресурсных сопряжений двигателя установлено, что выявленные, при помощи разработанного метода, рациональные трибоматериалы Oil Package и Micro-Ceramic Wagner по сравнению с другими трибоматериалами существенно снижают коэффициент трения, который не превышает 0,05, и износ образцов в 5-7 раз. Время стабилизации коэффициента трения не превышает одного часа. Установлено, что при наличии в масле трибопрепарата Oil Package, изменение исходной шероховатости

шлифованной поверхности образцов в пределах от 6В класса до 10В не оказывает влияния на образование задир в трибосопряжении. Стабилизация шероховатости наступает через 20-30 мин при испытании образцов.

Обоснована возможность сокращения периода послеремонтной эксплуатационной обкатки ДВС, которая может быть не менее 20 мото-часов вместо нормативных 60...120 мото-часов без образования задиров и, что наработка до первого ресурсного отказа может быть увеличена в два и более раза за счет использования рациональных трибоматериалов Wagner. Применение трибоматериалов Wagner исключают образование задиров в ресурсных сопряжениях и существенно снижает интенсивность изнашивания деталей.

Общим недостатком методов снижения износа узлов трения за счет внесения в смазочные масла антифрикционных добавок заключается в том, что действие добавок заканчивается через сравнительно небольшой период времени и требуется периодическое диспергирование масляной суспензии.

1.3. Методы снижения износа агрегатов ДВС, основанные на активации смазочных масел внешними энергетическими воздействиями

Существует ряд методов снижения износа элементов трибосопряжений, основанных на активации смазочных свойств масел внешними энергетическими воздействиями.

Известен способ и устройства для снижения износа пар трения путем воздействия на смазку постоянным током [98, 77, 83].

Рассмотрим работу электронного регулятора трения [77]. Схема регулятора представлена на рис. 1.5.

Тепло, выделяемое в узле трения, (прямо связанное с коэффициентом трения) фиксирует термодатчик 1. При определенной температуре в узле электрический сигнал термодатчика, усиленный в блоке 2, подается в блок управления 3, который включает устройство подачи постоянного напряжения 4, которое обеспечивает подачу постоянного тока на контакты,

подключенные гибкими проводами к деталям пары трения, причем сила тока пропорциональна температуре в узле трения.

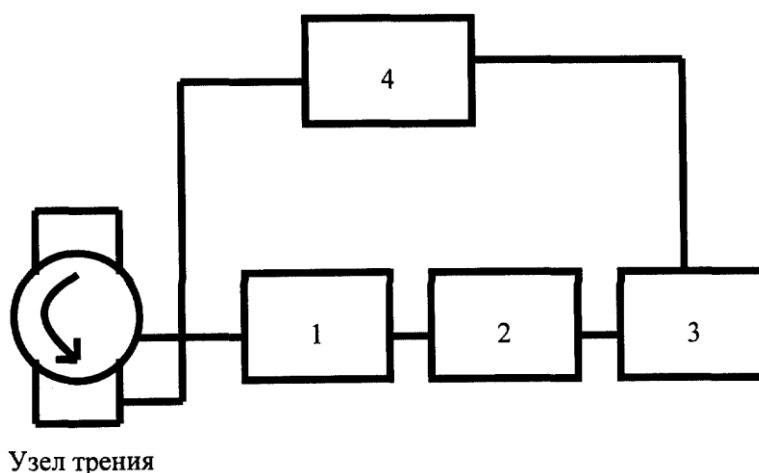


Рисунок 1.5 - Электронный регулятор трения: 1- термодатчик, 2 –блок усиления, 3 - блок управления, 4 - устройство подачи постоянного напряжения.

Действие постоянного тока улучшает трибологические свойства смазки и снижает износ деталей узла трения. Недостатками устройства являются:

- низкая эффективность, связанная с небольшим снижением износа деталей (4-5%);
- невозможность надежного подключения устройства к реальному ДВС из-за постоянного движения и вибрации деталей;
- высокие температуры в ДВС препятствуют точной настройке термодатчика;
- нахождение ДВС под напряжением требует дополнительных мер безопасности.

Недостатком способа воздействия на масло электрическим током является также отсутствие эффекта "памяти", то есть сохранения свойств масла после отключения тока.

Известны способ и устройство для снижения износа пар трения посредством обработки смазки постоянным током, приведенный в патенте на изобретение РФ № 2514189 [98]. Обработка смазочного материала происходит непосредственно в трибоузле, при этом на одну трущуюся

поверхность детали трибоузла подают постоянный ток положительной полярности, регулируемый по величине от 100 до 300 Мка, проходящий по замкнутой электрической цепи через слой смазочного материала к поверхности контрдетали. Подача тока осуществляется от источника питания, соединенного с потенциометром и регулятором величины и полярности тока. Для подтверждения технического результата, полученного данным способом, использовалась трехшариковая машина трения с парой "шар-цилиндр". В качестве смазки применялись минеральные моторные масла: U-technavigator 15W-40; Лукойл Стандарт 10W-40 и М8-Г₂.

Значение износа определялось как среднеарифметическое значение диаметров пятен износа по трем шарам при каждом значении тока и полярности. Результаты исследований работающего смазочного материала на трехшариковой машине трения приведены в табл.1.1.

Таблица 1.1 - Результаты исследований работающего смазочного материала на трехшариковой машине трения

Испытуемое масло	Среднеарифметическое значение диаметра пятна износа (мм)						
	Без пропускания тока	С пропусканьем тока					
		100 мкА		200 мкА		300 мкА	
		+	–	+	–	+	–
М8 - Г ₂	0,32	0,293	0,32	0,28	0,3	0,293	0,34
Лукойл Стандарт 10W-40	0,32	0,28	0,287	0,244	0,267	0,3	0,34
U-technavigator 15W-40	0,31	0,28	0,326	0,26	0,28	0,32	0,363

Результаты испытаний показали, что противоизносные свойства масел при положительном потенциале выше, чем противоизносные свойства масел, испытанных без пропуска тока и при отрицательном потенциале на шарах, причем при величине тока 200 мкА и положительной полярности этот эффект наиболее заметен. При пропускании тока от 100 до 300 мкА износ деталей трибоузла снижается в среднем на 10-20%.

Вышеописанный способ обладает теми же недостатками, что и способ, приведенный в [77]. Дополнительный недостаток - необходимость ручной регулировки силы тока.

Известен способ и устройство для снижения износа пар трения путем воздействия на смазку высокочастотными электромагнитными импульсами [96].

Схема устройства управления смазочным действием представлена на рис. 1.6.

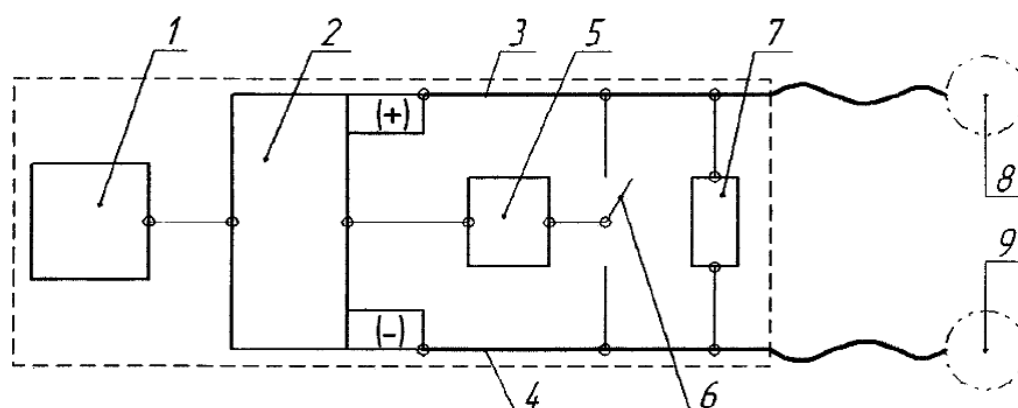


Рисунок 1.6 - Устройство управления смазочным действием: 1 - источник напряжения, 2 - преобразователь, 3 - анод, 4 - катод, 5 - генератор, 6 - переключатель, 7 - индикатор работы, 8,9 - элементы узла трения

Устройство функционирует следующим образом: постоянное напряжение от источника 1, через преобразователь 2 и генератор 5, преобразуется в высокочастотные электромагнитные импульсы (частота 1,4 ГГц.), которые через анод 3 и катод 4 подаются к элементам узла трения 8 и 9. Переключатель 6 позволяет менять полярность импульсов. Индикатор 7 сигнализирует об исправной работе устройства или о неисправности.

Предлагаемое устройство обеспечивает повышение коэффициента полезного действия, экономию потребления энергоресурсов, нивелирование износа адгезионного типа, за счет импульсного воздействия электромагнитного поля модулируемой при трении частоты на смазочную способность материалов, составляющих их узлы трения.

Установлено, что воздействие электромагнитного поля определенной частоты на фрикционное взаимодействие материалов не только катализирует адгезионный перенос, но и возникающие при этом пондемоторные силы способствуют перемещению мезо и макро-объемов вещества, которым в частности может выступать смазочный материал, то есть дополнительно способствуют лучшему распределению смазочной среды по поверхности трения и ее ориентации в поле действия фрикционных сил. Причем, внешними факторами, определяющими величину возникающей пондемоторной силы, и соответственно степень ее воздействия на формирование защитной смазочной пленки на поверхности трения, являются: частота внешнего импульсного воздействия и электрическая энергия процесса поляризации вещества. Установлено, что повышению антифрикционных характеристик узла трения способствует воздействие на него частотой 1,4 ГГц. На рис. 1.7 приведены фотографии поверхностей трения, покрытых смазочным материалом, выполненные на сканирующем туннельном микроскопе. На рис. 1.7 (а) представлена фотография поверхности трения при использовании устройства, на рис. 1.7 (б) - без использования устройства.

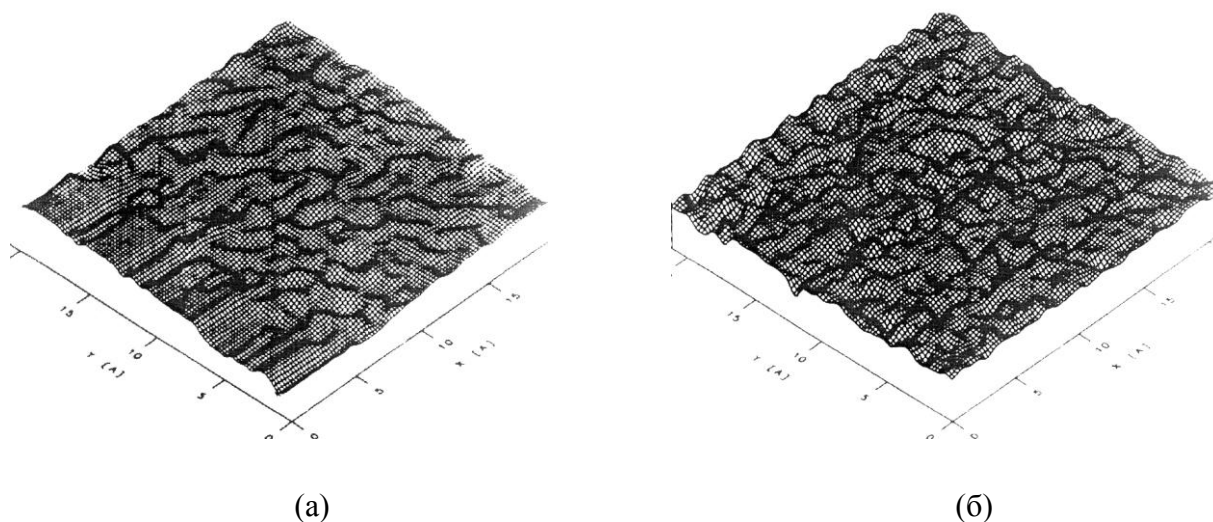


Рисунок 1.7 - Поверхности трения, покрытые смазочным материалов

Видно, что при использовании устройства в «антифрикционном режиме» поверхность трения более однородно покрыта молекулами

смазочного материала - наблюдается ее лучшее смачивание. В данном случае молекулы располагаются на поверхности трения в виде длинных цепей (это подтверждает структурирующее влияние на смазочный материал устройства) с четко выраженной ориентацией как по высоте (в виде «ворса»), так и в направлении трения, что в соответствии с общими законами трения способствует снижению коэффициента трения и повышения несущей способности сопряжения.

Известно, что контактное напряжение, которое может выдержать хорошо ориентированный граничный слой толщиной 0,02-0,04 мкм, составляет 5-6 МПа, а несущая способность полимолекулярного слоя не превышает 5-10 МПа [11]. В соответствии с чем, в пределах указанных значений можно говорить об исключении возможности проявления износа адгезионного типа.

Испытания пар трения сталь-бронза, а также сталь - фторопласт на машине трения торцевого типа при работе предлагаемого устройства показали, что воздействие на масло электромагнитными импульсами позволяет получить снижение износа деталей узла трения до 11%. Выполненное в виде отдельного блока устройство может быть подключено к ДВС.

Недостатками устройства являются:

- недостаточное снижение износа деталей;
- также, как и при воздействии током, снижение износа деталей узла трения наблюдается только при включенном устройстве;
- дорогостоящие меры обеспечения безопасности, связанные с постоянным нахождением ДВС под напряжением.

Представляет интерес способ улучшения антифрикционных свойств смазочного масла и реализующие его устройства, использующие обработку смазочного масла магнитным полем [75, 76, 78, 3]. Источниками магнитного поля могут выступать, как природные магниты, так и соленоиды. Рассмотрим типичный пример магнитного устройства - магнитоактиватор для обработки

смазочных масел [75]. Упрощенный чертеж магнитоактиватора представлен на рис. 1.8. Устройство содержит корпус из ферромагнитного материала, трубопровод из немагнитного материала и несколько пар магнитов, расположенных с разных сторон трубопровода, причем пары, находящиеся с разных сторон, расположены со смещением. Трубопровод магнитоактиватора включается в систему смазки узла трения (например, ДВС). Масло, циркулирующее в системе смазки, обрабатывается магнитным полем.

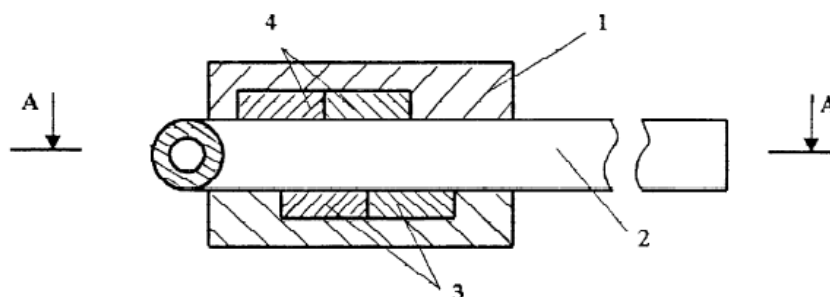


Рисунок 1.8 - Чертеж магнитоактиватора: 1- корпус; 2 - трубопровод; 3 и 4 - пары магнитов.

Были проведены износные испытания автомобильного компрессора при омагничивании смазочного масла при помощи магнитоактиватора (МА). Износ деталей компрессора оценивался по потере массы (методом взвешивания)

Снижение средней скорости (темпа) износа основных трущихся деталей кривошипно-шатунной группы при применении магнитоактиватора составляет от 13,9 до 16,6 %.

Достоинством способа является простота реализации и невысокая стоимость устройства. К недостаткам способа и устройства следует отнести невысокую эффективность. Поэтому, для повышения эффективности, в устройстве [76, 78], в дополнение к обработке масла магнитным полем, авторы предлагают вводить в масло металлосодержащую добавку, дисперсионные частицы которой омагничиваются вместе с маслом. Это приводит к усложнению и повышению стоимости устройств. Также, несмотря на защиту, при постоянном или периодическом нахождении узлов

техники под действием магнитного поля высокой напряженности, возникают магнитные наводки, приводящие к сбоям и отказам электронных приборов современной мобильной сельхозтехники.

Известны работы, авторы которых предлагают улучшать смазочные свойства жидких масел воздействием на них γ лучами [61, 34].

В работе [34] представлено исследование изменения физико-химических и эксплуатационных свойств моторного масла М-10Г₂ при облучении его гамма-излучением Co^{60} на установке РХМ γ - 20. Внешний вид установки представлен на рис. 1.9



Рисунок 1.9 - Внешний вид установки РХМ γ - 20

Полученные результаты показывают, что облучение масла как малыми дозами гамма-излучения (до 3,0 крад), так и более высокими (10^2 – 10^4 крад) не оказывает влияния на изменение вязкости и щелочного числа исследуемого масла

Результаты определения поверхностного натяжения исследуемого моторного масла показали, что оно снижается на 11,5% при дозе облучения 2 крад, а в дальнейшем остается почти постоянным. Электропроводность масла изменяется от дозы гамма-излучения. Наибольшее увеличение

электропроводности (около 11%) произошло в образце, который облучен дозой в 2 крад. При дальнейшем увеличении дозы гамма-излучения наблюдается понижение электропроводности моторного масла. Известно, что с ростом электропроводности моторных масел их моющее действие повышается. Учитывая это, можно предположить, что с повышением электропроводности масла в результате облучения улучшатся его моющие свойства.

Испытания противоизносных и антифрикционных свойств облученного моторного масла М-10Г2 выполнялись на четырехшариковой машине трения (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Результаты испытаний на машине трения

Доза облучения, крад.	Противоизносные и антифрикционные свойства					
	P_k , кН	Изм. P_k %	P_{ky} , кН/мм ²	K_m	Изм. K_m %	$СП_p$
0	0,9	100	1,73	0,09	100	0,43
1,0	0,95	105,5	2,26	0,085	94	0,46
2,0	1,0	111,5	2,7	0,078	87	0,51
3,0	1,0	111,5	2,51	0,082	91	0,495

Анализ полученных результатов (см. таблицу) показал, что облученные масла имеют лучшие противозадирные свойства. Максимальное увеличение критической нагрузки (P_k) на 11,5% установлено для образца моторного масла, облученного дозой 2 крад, по сравнению с необлученным маслом.

Антифрикционные свойства товарного и облученного масел оценивали по изменению коэффициента трения (K_m) в зависимости от осевой нагрузки. Установлено, что интенсивность увеличения коэффициента трения в зависимости от осевой нагрузки при работе на образце масла, облученного дозой 2–2,5 крад, почти в 2 раза меньше, чем при работе на образце товарного моторного масла.

Из данных таблицы видно, что облучение моторного масла оптимальной дозой значительно улучшает противоизносные и

антифрикционные свойства. Так, при дозе облучения 2 крад коэффициент трения снизился на 13% по сравнению с товарным маслом при нагрузках, не превышающих критические.

Известно, что $СП_p$ (степень приближения реальной противоизносной характеристики масла к идеальной) – величина безразмерная, меньше единицы и характеризует смазывающие свойства масла. Из данных таблицы видно, что $СП_p$ имеет большее значение у облученных масел.

Улучшение смазывающей способности облученных моторных масел объясняется их более высокой поверхностной активностью, чем товарных. Это приводит к образованию активных полярных частиц. Облученные образцы масла оказывают также значительное влияние на снижение интенсивности процесса истирания смазываемых поверхностей. Интенсивность износа шаров на облученном масле дозой 2 крад примерно в 1,8 раза меньше, чем при применении товарного масла.

Следует отметить, что исследования, приведенные в работах [61, 34], носят чисто лабораторный характер. Не были исследованы вопросы "сохраняемости" эффекта во времени после облучения, необходимости повторных облучений, радиационной безопасности эксплуатации облученного масла. Также не были предложены конструкции устройств для прикладного использования предложенного способа. Таким образом, вопрос практического применения способа остается открытым.

Известен способ повышения эксплуатационных параметров трибомеханических систем путем активации смазочных материалов лазерным излучением [69]. Были проведены исследования зависимости физико-механических характеристик смазочных масел (кинетической вязкости, коэффициента поверхностного натяжения и др.) от мощности и длины волны лазерного излучателя, а также от времени облучения. Выбран оптимальный источник излучения (гелий - неоновый лазер ГН - 40 - 1 с длиной волны 0,63 мкм и мощностью 45 мВт). Вид гелий - неоновой лазера представлен на рис.1.10.

Определено оптимальное время облучения – 15 мин.

К несомненным достоинствам метода лазерного облучения смазочных масел следует отнести эффект "памяти", то есть сохранения улучшенных трибологических свойств масла во времени. В зависимости от типа масла, мощности лазера и времени облучения, сохранение улучшенных трибологических свойств масла во времени может продлиться до 100 часов.

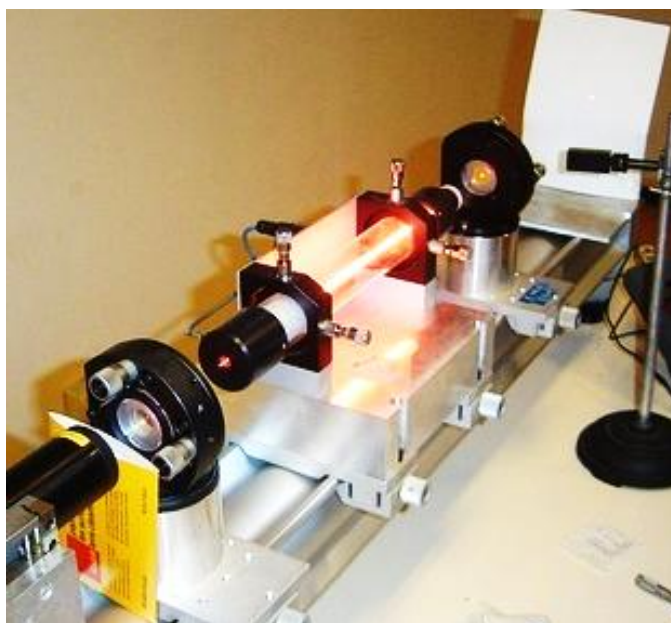


Рисунок 1.10 - Гелий - неоновый лазер ГН - 40 - 1

Были проведены испытания на машине трения образцов пар трения, смазанных маслом, облученным лазером. Зафиксировано снижение износа пар трения до 28%.

Однако высокая стоимость лазеров, сложность конструкции и высокая энергоемкость устройств для облучения смазки лазерным излучением воспрепятствовали прикладному применению предложенного способа.

В последние годы появились работы, посвященные вопросу улучшения технологических свойств нефтепродуктов, и, в частности смазок, посредством обработки их ультразвуком.

Работа [73] посвящена вопросам воздействия ультразвука на нефтяные системы для повышения эффективности нефтепереработки. Рассмотрено, в частности, использование ультразвуковой обработки нефти на поточной

ультразвуковой установке ГПР-1 для улучшения реологических свойств нефти Лузановского месторождения. В ходе работы установки динамическая вязкость нефти снижается на 45%, а температура застывания на 7⁰С. При этом реологические характеристики обработанной нефти сохраняются в течение длительного времени. Гидродинамическая ультразвуковая обработка нефти способствует также предотвращению отложений тяжелых асфальто-смолянистых веществ на стенках насосно-компрессорных труб. Также проведены исследования и предложен промышленный метод ультразвуковой обработки для обезвоживания и обессоливания нефти.

В статье [105] приведены результаты исследования влияния ультразвука определенной частоты на коллоидную стабильность, нейтрализующие и вязкостные свойства коллоидных систем смазочных материалов при различной продолжительности воздействия. Предложено объяснение ультразвукового воздействия на свойства высокощелочных детергентов с позиции физико-химической механики нефтяных дисперсных систем. Рекомендовано соблюдение превентивных мер и применение средств защиты с целью минимизации потенциального риска негативных последствий для здоровья работающих, вызываемых ультразвуковой обработкой для увеличения коллоидной стабильности и снижения вязкости смазочных масел

В работах [147, 163] представлены результаты исследований направленных на поиск путей повышения эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в дисперсных системах с несущей высоковязкой средой. Результаты проведенных исследований позволяют выполнить разработку эффективных пьезоэлектрических преобразователей малых размеров и повышенной мощности. Ограниченные размеры производимых промышленностью пьезоэлементов (диаметром не более 50-70 мм) не позволяют создавать пьезоэлектрические преобразователи требуемой мощности. Поэтому представляется целесообразным применение нескольких пьезоэлектрических

преобразователей, объединенных на общей излучающей накладке. Конструктивные схемы трех, четырех и семи пакетных пьезокерамических преобразователей (на основе пьезоэлементов типоразмера 50(70)x20x6 мм) мощностью более 3000, 4000 и 7000 Вт показаны на рис. 1.11.



Рисунок 1.11 - Пьезокерамические преобразователи

Созданные пьезоэлектрические преобразователи способны обеспечить питание излучателей с увеличенной поверхностью излучения и обеспечить введение в технологические среды требуемых энергий ультразвуковых колебаний. Создание, на базе новых знаний о кавитационном воздействии в дисперсных системах обеспечило возможность ускорения различных технологических процессов в промышленных условиях.

В патенте на изобретение РФ № 2055863 [81] предложен способ эффективной регенерации моторных масел, основанный на ультразвуковой кавитационной обработке с последующей фильтрацией для очистки от механических примесей и воды и нейтрализации кислотного масла, а также установка для его реализации.

Результаты изменения физико-химических показателей моторного масла, проработавшего в дизеле КамАЗ-740 в течение 10702 мото-часов и подвергнутого многократной ультразвуковой гидродинамической обработке на предлагаемой установке, приведены в табл. 1.3. Таким образом, ультразвуковая установка гомогенизирует отработанное масло, обеспечивая тонкое диспергирование механических примесей в нем, после чего осуществляется качественное и недорогое фильтрование и нейтрализация. Предлагаемая установка может быть выполнена как в стационарном, так и в

мобильном варианте. Габариты установки и технология регенерации позволяют использовать ее на месте потребления масла (в автохозяйстве, в машинно-тракторном парке, на полевых станах при посеве и уборке). В установке не используются узлы, механизмы или устройства с движущимися (вращающимися) частями, что повышает безопасность и надежность установки

Таблица 1.3 - Результаты изменения физико-химических показателей моторного масла

Характеристика	Физико-химические показатели		
	Моторное масло М-10-Г ₂ Г	Отработанное масло М-10-Г ₂ Г	Регенерированное масло М-10-Г ₂ Г
Кинематическая вязкость При 100 ⁰ СсСт	11±0,5	15,3	11,8
Массовая доля(%) механических примесей	Не более 0,015	2,06	Отсутствует
Массовая доля воды %	Следы	1,3	Отсутствует
Щелочное число, мг КОН/г	Не менее 6,0	1,2	7,2
Температура вспышки °С	Не ниже 200	185	215

Рассмотрено применение ультразвукового облучения для улучшения эффективности технологических водно-графитных смазок [43].

Объектом исследования являлась водно-графитовая смазка ОГВ-75.

Обработку ультразвуковыми колебаниями концентрата смазки ОГВ-75, разбавленного водой в соотношении 1:10, проводили генератором «Альфа-Биотон» с рабочей частотой 50-300 Гц и амплитудой колебаний 0,5-3,0 мм. Время обработки составило 30, 60 и 90 мин. Для сравнения результатов применяли также смазку без виброобработки. В исследованиях применялись косвенные методы определения коэффициента трения:

- по бочкообразности образца после осадки (метод С.И. Губкина);
- по результатам осадки кольцевых образцов определенной геометрии (метод А.Т. Мейла, М.Г. Кокрофта).

В качестве исходного материала образцов была выбрана сталь 35. Цилиндрические образцы (для метода С.И. Губкина) имели размеры $D_0 = H_0 = 35$ мм. В кольцевых образцах внешний и внутренний диаметры были равны соответственно 72 и 36 мм, высота – 24 мм. Осадочные плиты были изготовлены из стали 5ХНМ.

Заготовки партиями по 5 штук нагревали до температуры $1050^{\pm 10} \text{ }^{\circ}\text{C}$. Смазка на осадочные плиты наносилась ручным пневматическим распылителем в течение трех секунд с расстояния 250 мм от их оси под углом 30° к плоскости. Заготовки осаживали на кривошипном прессе силой 0,16 мН со степенью деформации $\varepsilon = 50\%$.

Изменение значений коэффициентов трения для смазки ОГВ - 75 при обработке ультразвуковыми колебаниями приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Изменение значений коэффициентов трения при ультразвуковой обработке

№ п/п	Виброобработка смазки		Коэффициент трения μ	
	Частота обработки Гц	Время обработки мин	По методу Мейла-Кокрофта	По методу Губкина
1	Отсутствует	Отсутствует	0,30	0,38
2	100	30	0,28	0,37
3	100	60	0,21	0,32
4	100	90	0,21	0,31

В результате экспериментов установлено, что обработка смазки ОГВ-75 ультразвуковыми колебаниями частотой 100 Гц в течение 60 минут снижает ее коэффициент трения на 30% по методу кольцевых образцов и на 16% по методу С.И. Губкина.

В работе [46] проведены исследования автомобильных моторных масел производства ТНК: минерального - SAE 15W40; полусинтетического - SAE 10W40 и синтетического - SAE 5W40. На основе экспериментальных исследований обнаружен эффект остаточной вязкости, заключающийся в том, что вязкость свежего моторного масла, прогретого до одной и той же

температуры термически и нагретого ультразвуком, имеет различное значение и в дальнейшем по мере остывания, меняется различным образом. Установлен механизм формирования эффекта остаточной вязкости на основе представлений о формировании в объеме моторного масла стоячих волн при воздействии на него ультразвука. Предложен принцип работы прибора на основе эффекта остаточной вязкости для контроля и прогнозирования процесса обкатки ДВС. Обоснованы основные рабочие параметры прибора для контроля и прогнозирования процесса обкатки ДВС. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что максимальное значение эффекта остаточной вязкости достигается при удельной интенсивности излучения ультразвука $I_y = 0,33 \text{ Вт/см}^3$, частотах излучения в пределах $(0,5 \cdot 10^5 \text{ Гц} \leq \nu \leq 3,0 \cdot 10^5 \text{ Гц})$, и температурах в пределах $(23^\circ\text{C} \leq t \leq 27^\circ\text{C})$, в зависимости от марки масла.

Создан опытный образец прибора на основе эффекта остаточной вязкости для контроля и прогнозирования процесса обкатки ДВС. Он определяет информационный параметр Δt (время падения рабочего тела в слое масла) с точностью до 0,01 сек, потребляемая мощность прибора составляет не более $W = 200 \text{ Вт}$. Устройство отличается простотой и удобством пользования, объем пробы масла составляет $12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, время измерения не превышает 30 мин, не оказывает разрушающего воздействия на пробу масла, после измерений масло возвращается в двигатель. Схема установки приведена на рис. 1.12. Разработана методика применения прибора на основе эффекта остаточной вязкости для контроля и прогнозирования процесса обкатки ДВС. Методика включает в себя определение Δt при 200 км и 600 км пробега автомобиля при обкатке. Установлено, что уже при пробеге $S = 200 \text{ км}$ можно контролировать процесс обкатки по информационному параметру Δt . Для автомобиля УАЗ – 39621 с двигателем УМЗ – 421 и моторного масла 15W40, это время должно попадать в интервал $(0,24 \text{ сек} \leq \Delta t \leq 0,25 \text{ сек})$. Для других марок масел и типов двигателя допустимый интервал Δt определяется экспериментально. Проведены производственные

испытания по применению созданного прибора для контроля и прогнозирования процесса обкатки ДВС, подтвердившие высокие эксплуатационные параметры опытного образца.

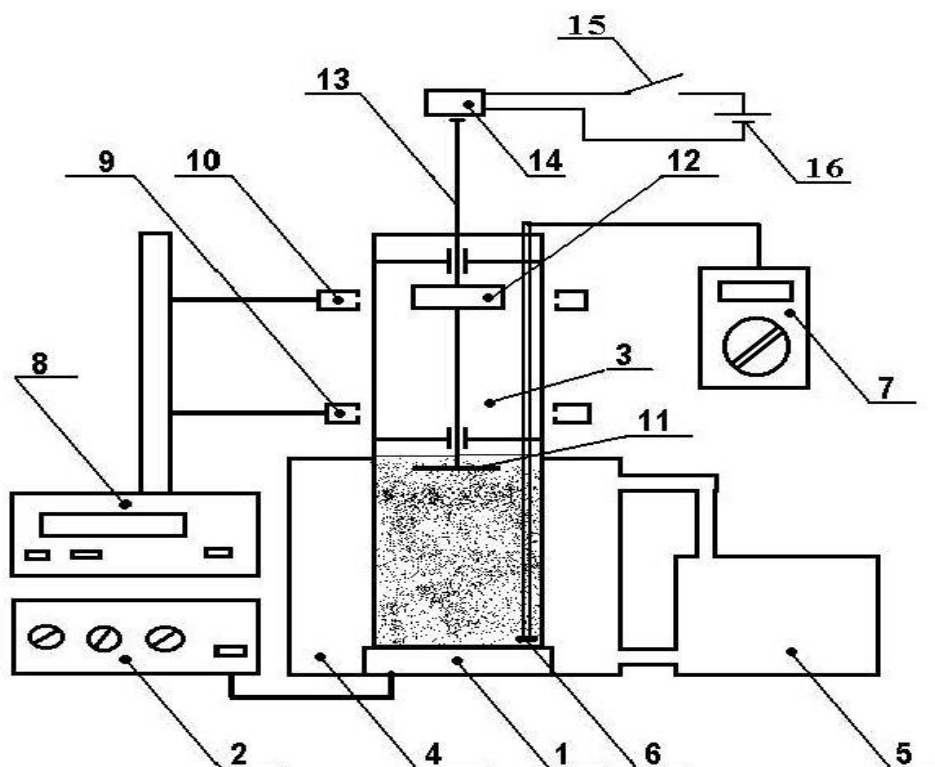


Рисунок 1.12. Схема установки: 1 – излучатель ультразвука; 2 – ультразвуковой генератор УТП – 1; 3 - колба с исследуемым маслом; 4 – термостатируемая ячейка; 5 – термостат MLW-EB; 6 - терморезистор (М9К1В 9104Δ); 7 – мультиметр М – 832; 8 – электронный секундомер FPM-02; 9 – нижний светодиод; 10 – верхний светодиод; 11 – плоское рабочее тело; 12 – экран; 13 – шток (жесткая ось); 14 – электромагнит; 15 – ключ; 16 – источник питания

Вопрос улучшения эксплуатационных свойств моторных масел затрагивается в статье [35].

В работе отмечается положительное влияние ультразвуковой обработки на моющие и противоизносные свойства моторных масел при соблюдении следующих требований для выбора акустической аппаратуры:

- мощность ультразвука в пределах $9...50 \text{ кВт/м}^2$;
- излучатели установки должны устойчиво работать при температуре $290...373^0 \text{ К}$;
- частота колебаний должна быть минимальной для ультразвука, что

обеспечит кавитацию при меньшей мощности;

- - время воздействия ультразвука на масло не должно ограничиваться техническими возможностями аппаратуры;
- - производительность установки должна обеспечить обработку ультразвуком такого количества масла, которое потребуется для проведения лабораторных исследований и эксплуатационных испытаний полноразмерных двигателей.

Однако в статье не приводятся результаты конкретных исследований, а рекомендации носят лишь общий характер.

Рассмотрим применение ультразвуковой обработки моторного масла, как способ снижения износа смазываемых пар трения [122]. В работе приводится описание обработки ультразвуком моторного масла непосредственно в испытательной камере машины трения СМТ-1. Обработка масла ультразвуком осуществлялась с помощью УЗ генератора, состоящего из блока управления и высокочастотного излучателя (типа Т25.4), установленного непосредственно в смазочной среде. Вид излучателя в открытой испытательной камере (до введения масла) представлен на рис. 1.13.

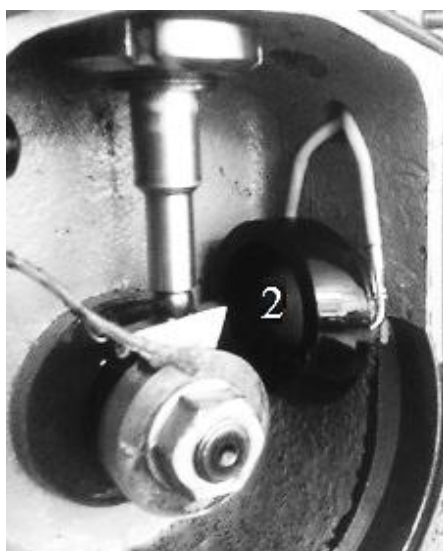


Рисунок 1.13 - Вид излучателя в испытательной камере: 2 - ультразвуковой излучатель (динамик).

В испытательной камере машины трения проводились приработочные и длительные износные испытания образцов трения (ролик-колодка), смазанных необработанным маслом и маслом, обработанным ультразвуком с частотой 17 кГц.

В результате приработочных испытаний установлено повышение предзадириной нагрузки на 4, 3.... 12,3%, а также снижение коэффициента трения до 25 % при воздействии на масло ультразвуком. В результате сравнительного анализа показателей износостойкости, полученных в результате длительных износных испытаний образцов, можно сделать вывод, что показатель фактора износа при обработке смазки ультразвуком с частотой 17 кГц уменьшился на 22%.

В работе показана возможность использования способа снижения износа узлов трения за счет обработки смазочных масел ультразвуком, а также оценена его эффективность.

Общим недостатком рассмотренных выше работ является отсутствие исследований зависимости физико-механических параметров жидких смазочных масел от температуры, от параметров ультразвука (частоты, мощности) и времени обработки, а также от местоположения источника ультразвука. Следует признать также, что на сегодняшний день отсутствует однозначная теория механизма воздействия ультразвуковых волн на смазочный материал и поверхность узлов трения, а эффект улучшения смазочных способностей масла под воздействием ультразвуковой кавитации приводится как "данность", без объяснения физических основ процесса.

1.4. Цель и задачи исследований

На основании проведенного анализа были сформулированы цель и задачи исследований.

Целью исследований является снижение износа агрегатов двигателей мобильной сельхозтехники при воздействии ультразвуковой обработки на смазочные масла.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследований:

- получить зависимости, описывающие влияние параметров ультразвука и времени обработки на физико-механические характеристики моторного масла и остаточные эффекты в нем.
- выявить зависимость фактора износа пар трения от частоты ультразвука при его воздействии на синтетические моторные масла;
- провести износные испытания образцов пар трения на машине трения СМТ-1М при обработке моторного масла ультразвуком;
- разработать конструктивно-технологическую схему устройства для периодической ультразвуковой обработки моторного масла в системе смазки агрегатов ДВС Д-240, провести стендовые износные испытания и оценить экономическую эффективность снижения износа агрегатов ДВС.

Выводы по первой главе

Основываясь на анализе реализаций существующих способов снижения износа агрегатов дизельных двигателей, а также работы различного типа устройств для электростатической, магнитной, электромагнитной, лучевой, лазерной и кавитационной обработки моторного масла, можно констатировать следующее.

1. Поскольку конструкция большинства современных двигателей доведена практически до совершенства, то прогнозируемое улучшение износостойкости их агрегатов может быть достигнуто, почти исключительно, за счет научно обоснованных программ эксплуатационных мероприятий, а также за счет совершенствования процессов обработки моторных масел при помощи энергетических воздействий, позволяющих улучшить трибологические свойства масел.

2. Существующие решения в области энергообработки моторных масел носят несистематизированный характер, при этом зачастую, при применении того или иного способа обработки, просто констатируется повышение

износостойкости агрегатов двигателей без объяснения физических основ процессов обработки.

3. Все предлагаемые решения используют лишь отдельные эффекты, реализуемые при различных способах обработки моторного масла. В частности, при ультразвуковой обработке моторного масла не выявлены физические основы процессов изменения свойств масла, и не определены оптимальные режимы функционирования устройства для обработки моторного масла и параметры ультразвука, в том числе частота и мощность излучения, а также время обработки. Поэтому, выбранная тема диссертационной работы "Снижение износа агрегатов дизельных двигателей мобильной сельхозтехники ультразвуковой обработкой моторного масла» является актуальной.

2. Физические основы кавитации и построение качественной модели разрыва сплошности жидкости при акустической кавитации. Понятие износа узлов машин и методы его определения. Оценка износа пар трения по показателю фактора износа

2.1 Физические основы кавитации

Явление кавитации было предсказано Л.Эйлером в XVIII веке и О. Рейнольдсом в 1873 году, задолго до его фактического обнаружения [166]. В 1893 г., при ходовых испытаниях, нового английского военного корабля «Дэринг» было обнаружено: гребные винты на быстром ходу интенсивно изнашиваются, покрываясь выбоинами, кавернами, а виной всему - многочисленные паровоздушные пузырьки, возникающие на лопастях. В 1894 году английский инженер Фруд назвал этот эффект кавитацией (от латинского *cavita* — пустота).

Кавитация представляет собой средство локальной концентрации энергии низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков (каверн). Процесс кавитации схематично представлен на рис.2.1.

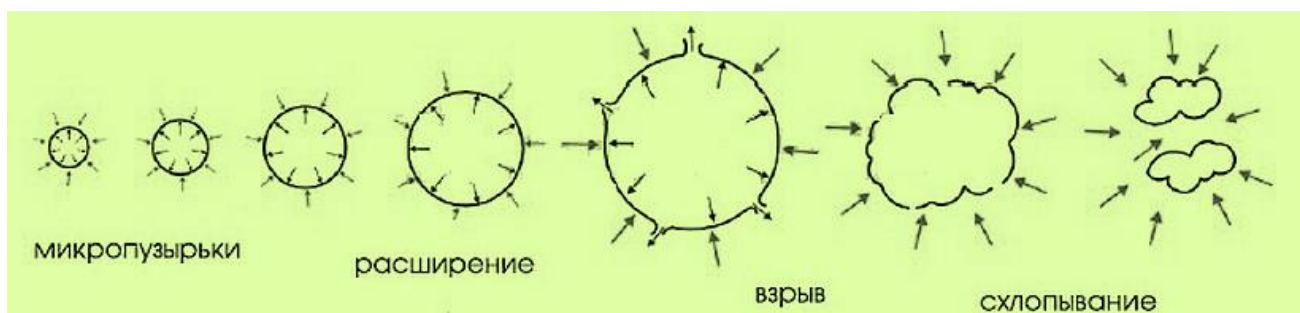


Рисунок 2.1 - Схема кавитационного процесса.

Пузырьки заполнены насыщенным паром или смесью насыщенного пара и газов, которые были растворены в данной жидкости. Размеры кавитационных пузырьков могут быть от микроскопических до громадных каверн, практически полностью заполняющих близлежащее пространство. Каждый кавитационный пузырёк, формируясь из ядра, растёт до конечных

размеров, после чего схлопывается. Весь процесс происходит в течение нескольких миллисекунд. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости. Понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении. Но этот процесс распространяется по всему объему жидкости в отличие от кавитации, которая имеет ограниченную область [162].

Различают гидродинамическую кавитацию, возникающую за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела, и акустическую кавитацию, возникающую при прохождении через жидкость акустических колебаний. Так как ультразвуковые колебания вызывают акустическую кавитацию, рассмотрим этот вид более подробно.

Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков [159]. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 1000⁰ С). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве [56]. Для того, чтобы в жидкости образовалась полость, необходимо раздвинуть соседние молекулы на расстояние не менее двойной длины промежутка между ними. Максимальное растягивающее напряжение, которое может выдержать жидкость, рассчитывается по формуле Рэлея [143, 56, 110]:

$$P \approx 2\sigma/R, \quad (2.1)$$

где P - напряжение, МПа; σ - поверхностное натяжение жидкости, Н/м;
 R - радиус пузырька, м.

Например, для воды при $R=2 \cdot 10^{-10}$ м, $P=1000$ МПа [161]. Реально же кавитационная прочность не обработанной воды не превышает нескольких десятков МПа. [56]

Расхождение между экспериментальной и теоретической прочностью объясняется наличием в реальных жидкостях различных примесей и включений, которые являются зародышами кавитации и сильно понижают прочность [56]. В любой жидкости зародыши кавитации могут образовываться также за счет заряженных частиц высоких энергий, присутствующих в космических лучах [114].

В большинстве исследований кавитации, особенно теоретических, рассматривают поведение единичного пузырька. В реальных условиях необходим целый комплекс мер, чтобы добиться существования одиночного пузырька. Даже при давлении, ненамного превышающем порог кавитации, сразу появляется множество кавитационных пузырьков, занимающих определенную часть пространства, которую называют кавитационной областью [114, 56, 110]. При импульсных растягивающих напряжениях в жидкости зародыши кавитации начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и длина которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями. Все зародыши достигают максимального размера одновременно, и среда может считаться практически монодисперсной, содержащей пузырьки только одного размера [71, 110].

В развитой кавитационной области количество кавитационных пузырьков превышает количество зародышей примерно в 10^5 раз. Это объясняется тем, что процесс возникновения кавитационных пузырьков является цепной реакцией [126, 56]. Кавитация, возникшая на единичном зародыше, за время в несколько десятков периодов ультразвуковых

колебаний развивается в стабильную область, состоящую из множества кавитационных пузырьков [156, 56].

В качестве величины, характеризующей степень развитости кавитации, Л.Д. Розенберг предложил использовать безразмерный индекс кавитации:

$$K = \Delta v / v, \quad (2.2)$$

где v – выделенный объем, м^3 ; Δv – объем всех кавитационных пузырьков, м^3 .

Индекс кавитации есть мера пространственной плотности энергии, а величина Δv пропорциональна потенциальной энергии, запасенной всеми содержащимися в объеме v пузырьками [56].

Представляет значительный практический интерес зависимость среднего индекса кавитации от периода колебаний первичной УЗ волны [146]:

$$K = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T R^3(t) \delta t}{R_{MAX}}, \quad (2.3)$$

где T - период колебаний первичной УЗ волны, с; $R(t)$ - мгновенный радиус кавитационного пузырька в зависимости от времени; R_{MAX} - максимальный радиус кавитационного пузырька, м.

Для создания кавитационной области используется определенная часть энергии первичного звукового поля. Отношение затраченной энергии к полной энергии первичного поля называется коэффициентом кавитационного использования акустической энергии [65, 56]:

$$\eta = \frac{E_K}{E}, \quad (2.4)$$

где η - безразмерный коэффициент; E_K и E - энергия, Дж.

Энергия звукового поля, идущая на образование кавитационной области, затрачивается в течение всей фазы расширения кавитационного пузырька. Это время несколько меньше периода первичного звука. Если принять это время равным периоду, то средняя за период мощность, которая затрачивается на образование всей кавитационной области, равна:

$$N_K = \frac{E_K}{T_0} = \eta \frac{E}{T_0} = N_\eta, \quad (2.5)$$

где N_K - средняя мощность, Вт, T_0 - период, с.

Кавитационная область представляет собой трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область [65, 56, 110].

Акустическая кавитация в жидкостях инициирует различные физико-химические явления; сонолюминесценцию (свечение жидкостей); химические эффекты (звукохимические реакции); эрозию твердого тела (разрушение поверхности); диспергирование (измельчение твердых частиц в жидкости) и эмульгирование (смешивание и гомогенизация несмешивающихся жидкостей) [110].

Явление кавитации нашло широкое применение в различных отраслях промышленности, в добыче нефти и производстве нефтепродуктов, гидротехнике, строительстве, транспорте, сельском хозяйстве, медицине и биотехнологиях [143, 129].

Однако, благодаря сложным и неоднозначным физико-химическим процессам, вызывающим кавитацию, связанным с кавитацией и вызванным кавитацией, это явление до сих пор до конца не изучено. Поэтому постоянно разрабатываются новые устройства, действия которых основаны на феномене кавитации, а также проводятся перспективные исследования аспектов и приложений кавитации и, в том числе, данная работа.

2.2. Качественная модель разрыва сплошности жидкости и образования парогазовых пузырьков при акустической кавитации

Из курса физики известно, что жидкости слабо сжимаются, но, в тоже время, они достаточно чувствительны к растяжению. Именно с растяжением, вызывающим последующий разрыв сплошности жидкости, связаны процессы

возникновения кавитации под воздействием знакопеременной продольной волны высокой частоты [159, 161, 160, 42, 52, 12]. При этом, в ближней зоне форма упругой волны сжатия-растяжения имеет сложный характер, что связано с наложением волн, формируемых различными участками поверхности излучателя высокочастотных колебаний [51,150]. Это наложение вызывает изменение интенсивности ультразвуковых колебаний в этой зоне. Дальняя зона ультразвукового поля начинается на последнем максимуме волны ближней зоны и продолжается до поверхности, в которой давление поля приближается к нулю [53].

Разрыв жидкости с последующим образованием паровоздушных пузырьков облегчается за счет того, что в ней всегда присутствуют неоднородности – микропузырьки газов, нерастворимые гидрофобные частицы, различные примеси и пр.

Теории кавитации, а также математические модели, описывающие воздействие волн на жидкости, в том числе неоднородные [60], а также модели образования ультразвуковой кавитации [70, 158, 149] достаточно хорошо известны.

Тем не менее, автор попытался представить здесь еще одну качественную модель разрыва сплошности жидкости при воздействии на нее ультразвуковых колебаний на основе выстраивания неразрывных бесконечных «нитей» молекул и встраивания между ними связывающих их «пружин». Модель разработана в соавторстве с научным руководителем диссертационной работы.

В качестве объекта для рассмотрения была выбрана вода, у которой исходно молекулы не структурированы и не сгруппированы (рис.2.2). Однако, известно, что силы взаимодействия между молекулами воды могут приводить к выстраиванию цепочек молекул [38, 39] вследствие наличия у них полярности – атомы кислорода и водорода обладают небольшими электрическими зарядами (отрицательный у кислорода и положительный у водорода) (рис.2.3). Такие цепочки были идентифицированы как

супранадмолекулярные комплексы и выявлены с использованием метода лазерной интерферометрии [131] (рис.2.4).

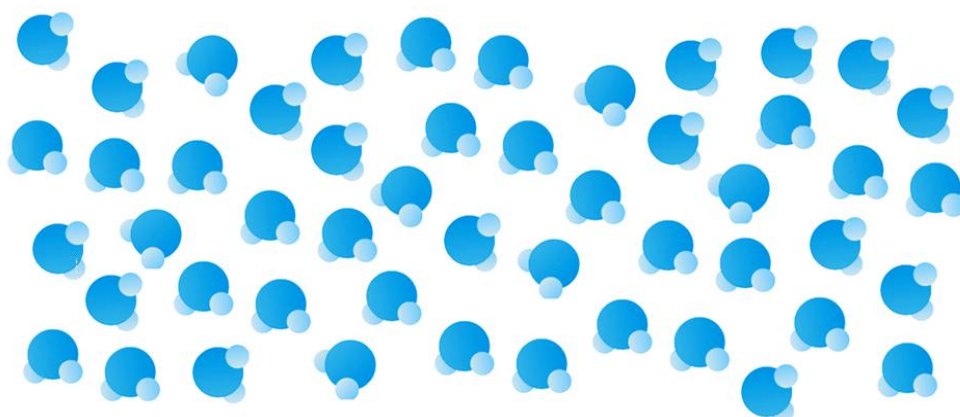


Рисунок 2.2 – Хаотичное расположение молекул воды

Основываясь на данных вышеприведенных работ, учтем силы взаимодействия молекул в слоях воды путем выстраивания параллельных неразрывных «нитей» молекул и учтем силы взаимодействия молекул между слоями путем встраивания между ними "пружин" (рис.2.5,2.6).

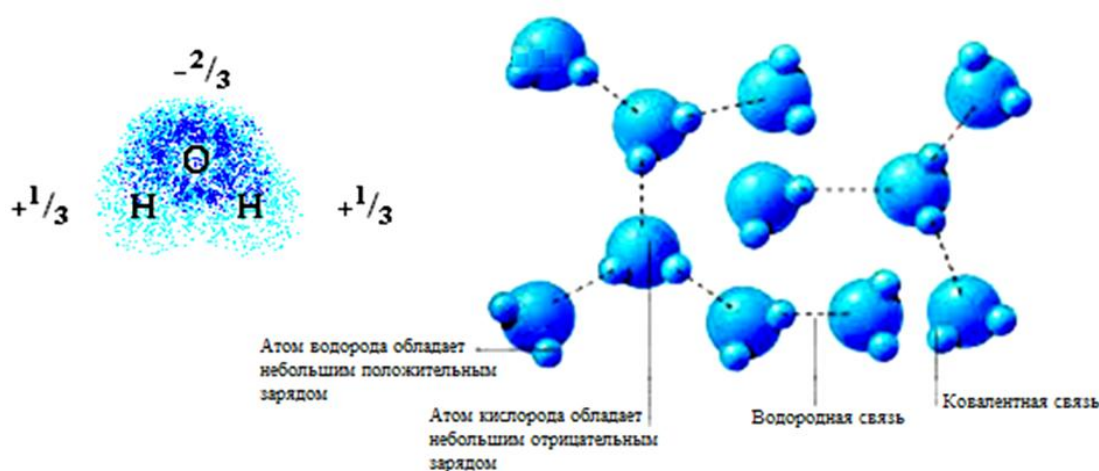


Рисунок 2.3 – Формирование цепочек молекул вследствие наличия у них полярности

Тогда расстояние между слоями – плотность, а жесткость пружин – вязкость (динамическая или кинематическая, которые характеризуют деформацию чистого сдвига). Примем допущение: слои могут растягиваться, но не разрываться, а пружины могут и растягиваться, и разрываться.



Рисунок 2.4 – Супранадмолекулярные комплексы упорядоченной воды (10...100 мкм)

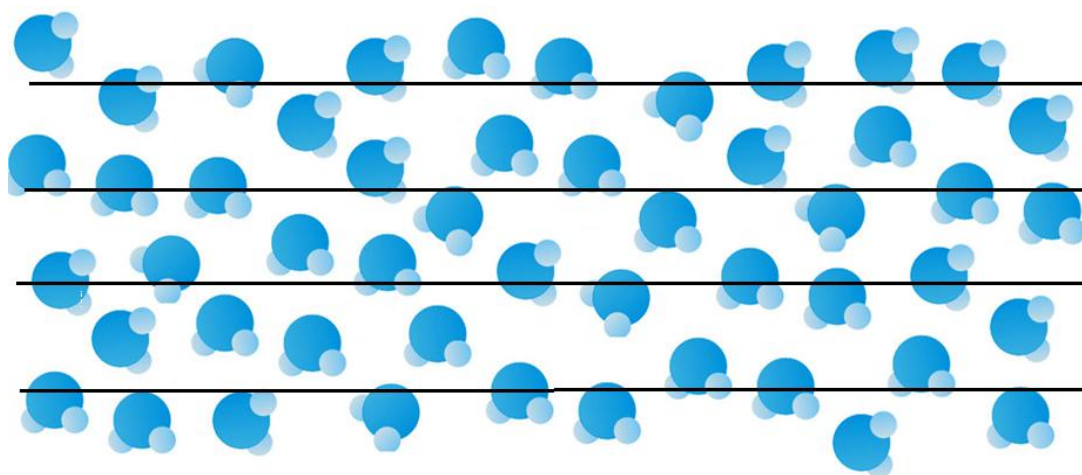


Рисунок 2.5 – Упорядочивание молекул слоями путем выстраивания параллельных неразрывных «нитей»

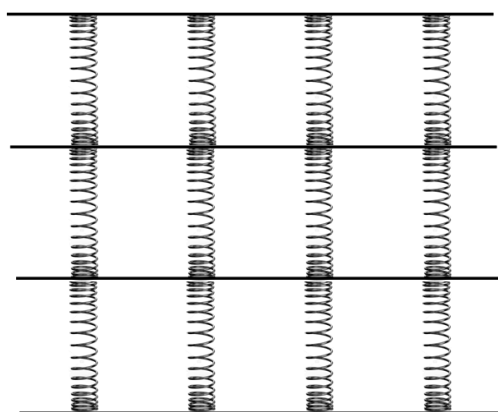


Рисунок 2.6 – Учет сил взаимодействия молекул между слоями

Рассмотрим возмущение от источника ультразвуковых колебаний, принимая во внимание инерциальность слоев жидкости, и выделим несколько характерных фаз возмущений (прогибов) слоев (рис. 2.7).

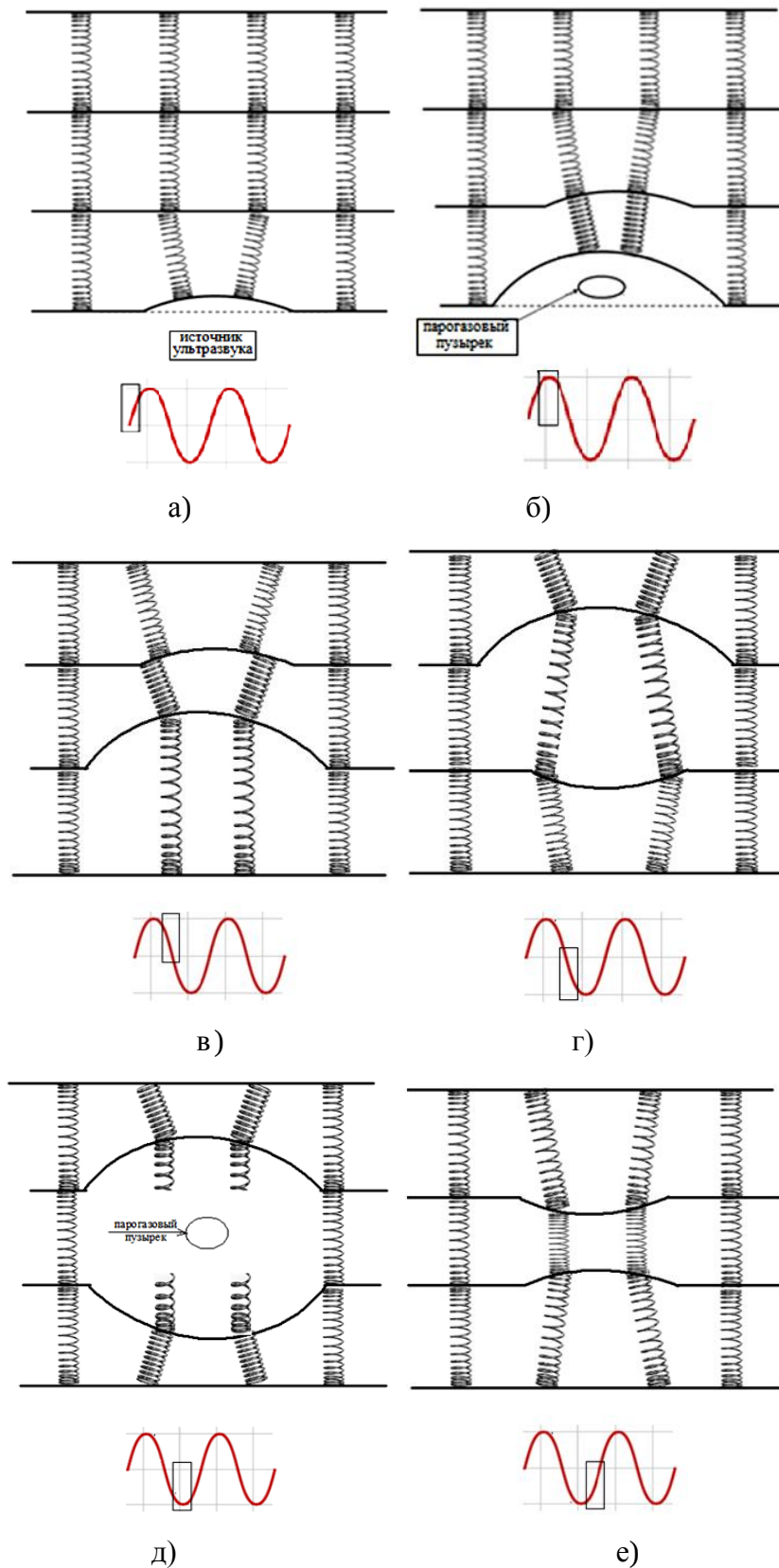


Рисунок 2.7 – Фазы процесса образования кавитационного пузырька.

Предположим, что волна возмущения представлена гармоническим колебанием, при этом условно можно выделить шесть фаз – три в зоне сжатия (рис.2.7 а-в), три – растяжения (рис.2.7 г-е). После завершения последней шестой фазы (рис.2.7 е) процесс начинается сначала (рис.2.7 а).

В *первой фазе* (рис.2.7 а) возмущение передается от источника колебаний на первый слой молекул, вызывая его отклонение от исходного положения в сторону, противоположную расположению источника возмущения. Во *второй фазе*, вследствие инерционности слоев передача возмущения от первого слоя к следующему (вышележащему) осуществляется с временной задержкой (рис.2.7 б), пропорциональной расстоянию между слоями (плотностью), жесткости пружин (вязкостью) и мощности источника возмущений (колебаний). При достаточно большой амплитуде колебаний – уже возможен разрыв сплошности жидкости в пристеночной области. В *третьей фазе* (рис.2.7 в), несмотря на падение амплитуды колебаний, инерционность движения слоев жидкости поддерживает процесс передачи возмущений от слоя к слою – по направлению от источника колебаний. *Четвертая фаза* (рис.2.7 г) характеризуется противоположным движением соседних слоев жидкости – сначала в области слоев, ближайших к источнику колебаний, с последующим распространением этого процесса все дальше и дальше от него. В *пятой фазе* при достижении разности фаз двух ближайших слоев жидкости порядка 180^0 происходит разрыв ее сплошности, и образуется парогазовый пузырек (рис.2.7 д). В *шестой фазе* взаимно противоположные перемещения соседних слоев компенсируются за счет восстановления связей (пружин) (рис.2.7 е). Далее фазы процесса повторяются.

Следует подчеркнуть, что не столько от мощности, сколько от частоты источника колебаний, а также от «сопротивляемости» слоев перемещению и расстояния между слоями зависит разность фаз между ними, которая, как раз, и является причиной разрыва сплошности жидкости.

Кроме того, форма емкости, а именно ее высота, а, точнее, высота столба жидкости в ней, также будет влиять на перемещение ее вышележащих слоев вследствие наличия разности давлений в жидкости между нижними и верхними слоями. Поэтому чем дальше (выше) от источника колебаний, тем сложнее будет разорвать сплошность жидкости, и тем существеннее будет затухание процесса образования парогазовых пузырьков.

Примем рассмотренный вариант возникновения колебаний за «базовый», и определим, насколько увеличение плотности и вязкости жидкости способствует или препятствует процессу возникновения парогазовых пузырьков.

Рассмотрим следующие возможные варианты: - низкая плотность - низкая вязкость; - высокая плотность - низкая вязкость; - низкая плотность - высокая вязкость; - высокая плотность - высокая вязкость.

На рисунке 2.8 представлена графическая интерпретация возможных вариантов, и введены следующие обозначения: а – двукратное увеличение плотности при сохранении вязкости между слоями (соответствует, фактически, двукратному увеличению вязкости); б – двукратное увеличение плотности при сохранении вязкости на единицу объема или длины (жёсткость пружин, между слоями снижается, а, следовательно, уменьшается вязкость); в – двукратное снижение плотности при сохранении вязкости между слоями (соответствует, фактически, двукратному уменьшению вязкости); г – двукратное снижение плотности при сохранении вязкости на единицу объема или длины; д – снижение вязкости при сохранении плотности (два варианта – аналогичное количество пружин с меньшей жесткостью на единицу длины или меньшее количество пружин на единицу длины/объема); е – повышение вязкости при сохранении плотности.

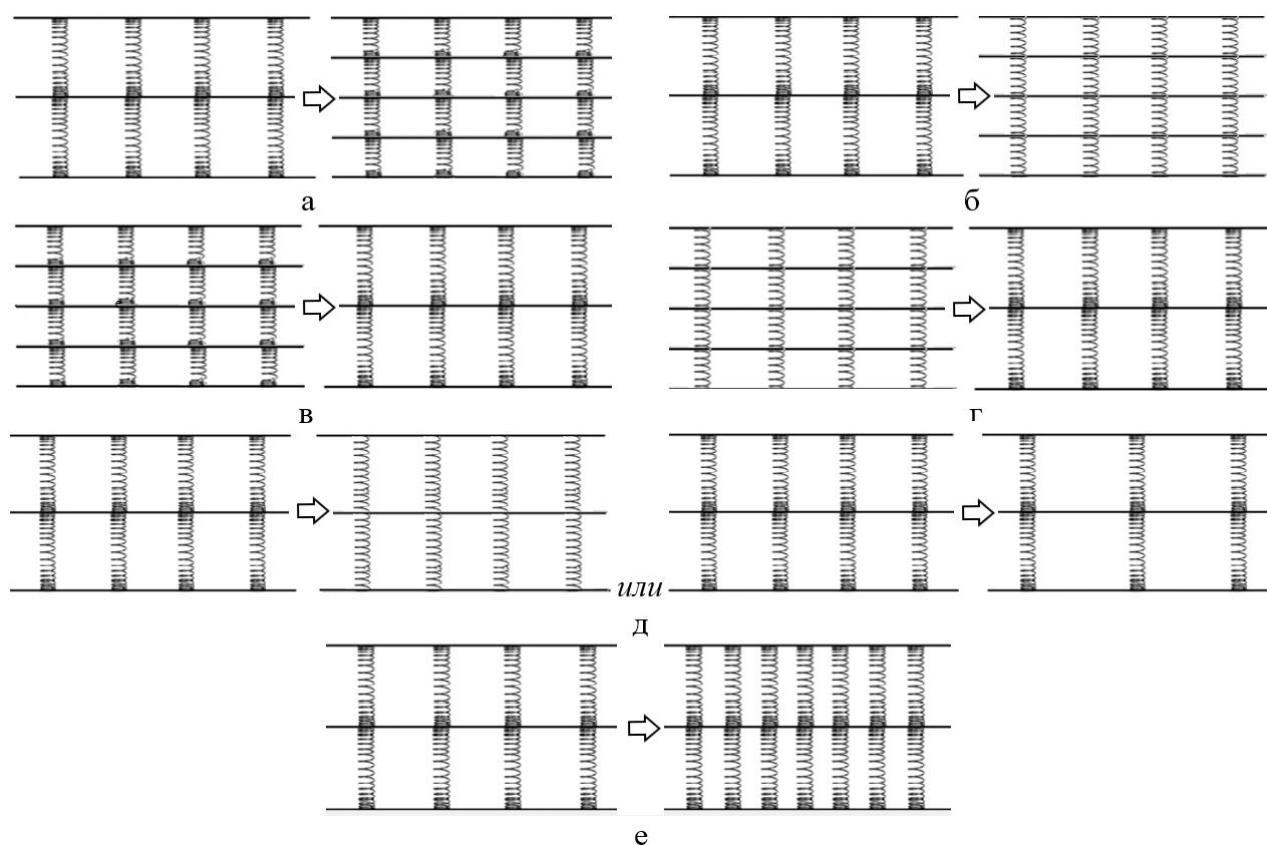


Рисунок 2.8 – Интерпретация изменения плотности и вязкости жидкости.

Рассмотрим изменения условий возникновения кавитации при одновременном увеличении плотности и вязкости жидкости (рис.2.8 а). При воздействии возмущения, формируемого излучателем колебаний, его передача от слоя к слою, с одной стороны, «облегчается» вследствие повышения жесткости связей и, следовательно, более быстрого отклика вышележащих слоев жидкости на возмущения, а, с другой стороны, это утверждение справедливо, если не учитывать расход энергии источника колебаний на приведение в движение большего количества слоев жидкости. Этот дополнительный расход энергии приведет к снижению высоты «столба» кавитации. Следовательно, для обеспечения условий кавитации, аналогичных исходным, следует увеличить частоту возмущений и увеличить мощность источника возмущений.

Для варианта, изображенного на рисунке 2.8 б, характерно снижение скорости реагирования на возмущения со стороны нижележащего слоя

вследствие увеличения времени его передачи из-за пониженной жесткости пружин (низкой вязкости жидкости). С одной стороны, из-за более частого расположения слоев (высокой плотности жидкости), частота колебаний должна быть повышена, однако, с другой стороны, это повышение будет нивелироваться понижением скорости передачи возмущения от слоя к слою. Поэтому, в рассматриваемом случае, изменение частоты от исходной не будет определяющим для развития и поддержания кавитации, в отличие от увеличения мощности источника колебаний, которое будет влиять на величину прогиба нижнего (и, опосредованно, всех последующих) слоев. При этом количество парогазовых пузырьков в кавитационном «столбе» возрастет из-за увеличения количества слоев жидкости, даже без увеличения мощности источника колебаний.

Варианты, изображенные на рисунках 2.8 в и 2.8 г, являются противоположными случаями вариантов, изображенных на рисунках 2.8 а и 2.8 б, соответственно, и мы не будем их подробно рассматривать, поскольку выводы являются тривиальными.

Уменьшение вязкости при сохранении плотности (рис.2.8 д, схема слева) – аналогичное количество пружин с меньшей жесткостью на единицу длины – будет вызывать увеличение времени передачи возмущения от слоя к слою, а также, по сравнению с исходным вариантом, формировать меньший прогиб верхних слоев, поэтому кавитационный «столб» будет неразвит, но реализовываться при меньшей мощности источника ультразвуковых колебаний. Повышение частоты колебаний приведет к формированию только пристеночной кавитации.

Вариант, приведенный на правой схеме рисунка 2.8 д, имеет, скорее, чисто теоретический интерес, поскольку вряд ли на практике его можно будет отличить от левой схемы, и, соответственно, реализовать и оценить.

Для варианта увеличения вязкости при сохранении плотности (рис.2.8 е) будет характерен более быстрый отклик вышележащих слоев жидкости на возмущение, приходящее со стороны нижележащих, а также большее

потребление мощности, генерируемой излучателем колебаний на сжатие-растяжение пружин. Высота кавитационного «столба» в этих условиях невелика. Поэтому при переходе с исходного варианта на рассматриваемый следует увеличить мощность и частоту источника колебаний.

Получить воду с «запрограммированными» плотностью и вязкостью весьма проблематично (исключение составляют только труднодоступные для проведения экспериментов дейтерий и тритий), поэтому предположим, что формирование аналогичных связей возможно и в других жидкостях.

Для оценки корректности приведенных предположений были проведены эксперименты с моторными маслами ЛУКОЙЛ СТАНДАРТ SAE 10W-40 (минеральное), Shell Helix HX7 10W-40 (полусинтетическое) и ZIC X7 Diesel 10W-40 (синтетическое). Характеристики плотности и кинематической вязкости при $T=100^{\circ}\text{C}$ этих масел приведены на рисунках 2.9 и 2.10

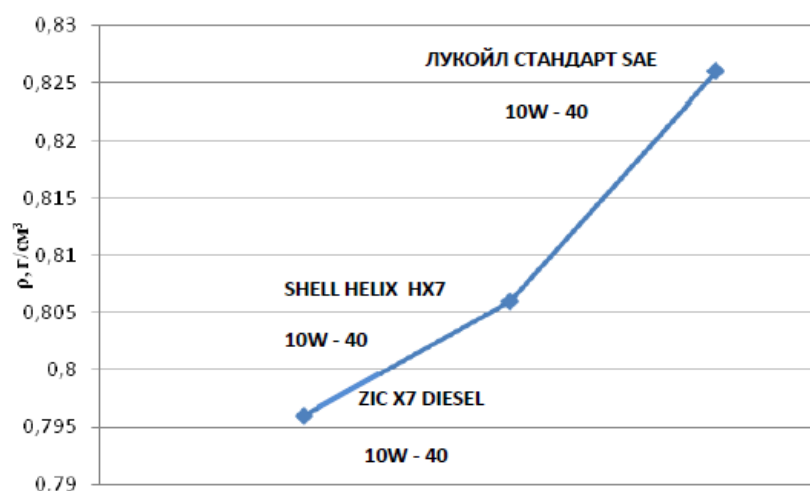


Рисунок 2.9 – Плотность масел ($T=100^{\circ}\text{C}$)

Плотности исследуемых масел приводятся производителем при температуре 15°C (это установлено соответствующими стандартами), Используя таблицы приведения документа Р.50.2.76-2010 [113], получили значения плотностей данных смазочных масел при 100°C .

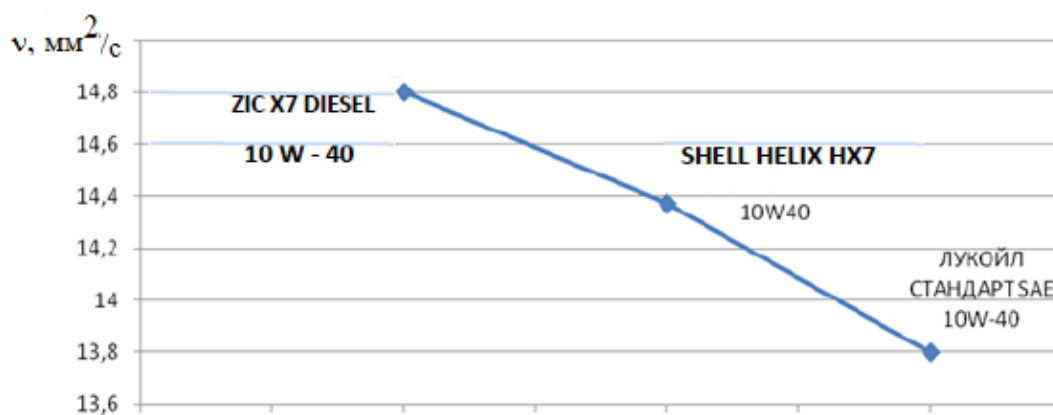


Рисунок 2.10 – Кинематическая вязкость масел ($T=100^{\circ}\text{C}$)

Анализ характеристик плотностей и вязкостей масел (рис. 2.9, 2.10) показывает, что для рассматриваемых масел – в порядке от синтетического к минеральному – можно использовать вариант, изображенный на рисунке 2.8 б (увеличение плотности при снижении вязкости между слоями) [165].

В качестве характеристики масел, оцениваемой в процессе воздействия ультразвуковой обработки, был выбран коэффициент поверхностного натяжения (раздел 3.2 данной работы), потому, что поверхностное натяжение жидкости является частью понятия внутренней энергии [145,127], которую можно изменять воздействием ультразвука от внешнего источника. При этом коэффициент поверхностного натяжения несложно оценить в процессе проведения экспериментальных исследований. Зависимости изменения коэффициента поверхностного натяжения от частоты колебаний и мощности источника колебаний могут быть выбраны в качестве параметров для оценки влияния изменения плотности и вязкости жидкости при воздействии на нее ультразвука.

Таким образом, некоторые положения предложенной качественной модели влияния плотности и вязкости жидкости на разрыв ее сплошности при акустической кавитации были экспериментально подтверждены (см. п. 5 выводов к четвертой главе данной работы). Эти результаты имеют практическую ценность, так как ультразвуковая обработка смазочного масла существенно снижает износ сопряженных деталей [117].

2.3. Понятие износа узлов машин и методы его определения.

Сравнительная оценка износа при трибологических испытаниях пар трения по показателю фактора износа

Установлено, что 85-90% ДВС машин сельхозназначения выходят из строя в результате накопления постепенных повреждений (изнашивания) и только 10-15% по другим причинам. Изнашивание узлов машин и механизмов определяется их нагрузочной способностью, режимами работы и условиями эксплуатации [22].

Согласно ГОСТ 27674 - 88 износ является результатом изнашивания.

Методы определения износа разделяются на: - расчетные; - расчетно-экспериментальные; - экспериментальные.

Расчетные методы базируются на данных о типах износа, свойствах материалов, режимах и условиях трения, данных об износе идентичных изделий. Расчетные методы следует применять на стадии конструирования изделий.

Выполненные на стадии проектирования расчеты узлов трения на износ способствуют создать оптимальный механизм.

Однако отсутствие единой теории износа, охватывающей все аспекты изнашивания, приводит к большой погрешности расчетных методов. Например, оценки износа, проведенные по методу расчета абразивного изнашивания деталей цилиндропоршневой группы ДВС, предложенному Г.Я. Ямпольским и А.В. Южаковым, при сравнении их с результатами испытаний реальных двигателей АМЗ дали большие расхождения [41].

Поэтому, в реальной инженерной практике, выбор материалов для узлов трения и конструкций агрегатов ДВС осуществляется в основном на основании расчётов на прочность и тепловых расчетов ДВС [40], а триботехнические параметры будущего узла трения выбираются на основании опыта, а также интуиции конструктора.

Экспериментальные методы основаны на использовании данных, получаемых при испытании изделий, или данных подконтрольной

эксплуатации. Экспериментальные методы используются при определении эффекта снижения износа изделий при проведении ремонтных, обкаточных и послеремонтных эксплуатационных мероприятий. Применение чисто экспериментальных методов оценки износа узлов реальных машин сопряжено с определенными трудностями, а сроки испытаний могут растягиваться до нескольких лет.

Если по техническим, экономическим или организационным причинам невозможно или нецелесообразно применять экспериментальные методы, а также для сокращения объема и сроков испытаний, применяются расчетно-экспериментальные методы.

Расчетно-экспериментальные методы основаны на вычислении показателей износа по данным об износе изделий, определяемым экспериментальными методами. Часто для расчетно-экспериментального определения износа изделий используются способы экстраполяции.

К настоящему времени разработан ряд методов определения износных параметров изделий [58,67,148, 19].

Методика расчетов на изнашивание, разработанная И.В. Крагельским и его школой [49], рассматривает понятие удельного износа i , т.е. съема материала объемом $\Delta V(\text{м}^3)$, на единицу фактической площади контакта $A_r(\text{м}^2)$ на пути скольжения, равном среднему диаметру пятна контакта $d(\text{м})$, т.е.:

$$l_h = \frac{\Delta V}{d \cdot A_r} = \frac{\Delta h}{d}, \quad (2.6)$$

где Δh - толщина изношенного слоя материала, м.

Для расчета интенсивности изнашивания I_h может быть использовано уравнение:

$$l_h = i_h \cdot \alpha \cdot \frac{P_a}{P_r}, \quad (2.7)$$

где P_a - номинальное контактное давление, Па; P_r - фактическое контактное давление, Па; α - отношение номинальной площади контакта к площади трения.

Это уравнение справедливо для описания процесса изнашивания при любом его механизме.

Классификация видов износа учитывает особенности контакта, изменения и разрушения трущихся поверхностей. Характер нарушения фрикционной связи на пятне касания и процессы, протекающие в поверхностных слоях и микрообъемах, существенно зависят от целого ряда факторов [11]. Один из таких факторов - геометрический, характеризующийся отношением глубины внедрения или величин сжатия к радиусу единичной неровности, дает возможность различать контакты: упругий, пластический и микрорезание. Другой, физико-механический, определяется отношением величины тангенциальной прочности молекулярной связи к пределу текучести материала основы.

В свете предложенной классификации выберем уравнение, описывающее упругий контакт при приработанных поверхностях и стационарном износе:

$$l_{h_1} = C_1 \cdot P_a \cdot \theta \cdot \left(\frac{\tau_0 \cdot \theta}{\alpha_y} \right)^{\frac{t_y}{2}} \cdot \left(\frac{K_y \cdot f_{min}}{\sigma_0 \theta} \right)^{t_y}, \quad (2.8)$$

где l_{h_1} - интенсивность изнашивания; C_1 - коэффициент, зависящий от гамма функции; P_a - номинальное давление; θ - коэффициент эластичности изнашиваемого образца; τ_0 - фрикционный параметр, зависящий от условий работы пары трения; t_y - параметр кривой функциональной усталости (для упругого контакта); σ_0 - разрушающее напряжение при однократном растяжении, МПа; f_{min} - минимальный коэффициент трения; K_y - поправочный коэффициент, зависящий от f и коэффициента Пуассона для материала изнашиваемого образца (μ).

Анализ уравнения (2.8) позволяет выявить круг внешних и внутренних причин, влияющих на износ материала. К первым относится совокупность оперируемых в рамках эксперимента параметров: нагрузка, скорость относительного перемещения образцов, исходная шероховатость трущихся

поверхностей, температура и влажность в месте проведения эксперимента, введение абразива различной дисперсности и др. Ко вторым - физико-механические свойства материалов, температура на фрикционном контакте, образование пленок на поверхностях при трении, сдвиговое сопротивление, напряжения на изнашивающихся площадках контакта, коэффициент трения и другие факторы.

Исходя из вышеизложенного, уравнение (2.8) может быть представлено тождеством:

$$\frac{J_{h1}}{P_a} = \Phi_1(M_1) \quad (2.9)$$

где $\frac{J_{h1}}{P_a}$ — коэффициент (или фактор) износа; $\Phi_1(M_1)$ - комплекс внутренних аспектов, определяющих физико-механические свойства тонких поверхностных слоев материалов, измененных под действием внешних условий фрикционного контакта.

Таким образом, фактор износа $\Phi = \frac{J_h}{P_a}$ был определен теоретически, исходя из представлений усталостного механизма изнашивания материалов для случая упругого контакта и приработанного состояния поверхностей. В правой части тождества (2.9) находятся физико-механические свойства и фрикционные параметры поверхностей, зависящие от внешних условий, в частности, от температуры, развивающейся на поверхностях при трении. Поскольку интенсивность изнашивания для приработанного упругого контакта пропорциональна P_a то отношение $\Phi = \frac{J_h}{P_a}$ не зависит от номинального давления, при котором ведется испытание на износ материала, и определяется физико-механическими свойствами материалов пары трения.

При упругом приработанном контакте трущихся поверхностей и наличии стационарного износа фактор Φ может служить характеристикой износостойкости в условиях, когда изменение температуры на контакте за счет изменения нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей не приводит к существенному изменению физико-

механических и фрикционных свойств материалов (например металлов и металлических сплавов с высоким модулем упругости и твердостью), т.е. Φ - постоянно.

Поэтому для сопоставления результатов при испытаниях на износ приработанных образцов пар трения (см. разделы 3.8 и 4.4) целесообразно пользоваться показателем фактора износа Φ .

2.4. Оценка влияния ультразвуковой кавитации в маслах на основные трибологические характеристики смазки и износ пар трения.

Высокие температуры, вибрация и другие факторы приводят к тому, что преимущественным режимом смазки автотракторных двигателей становится режим граничного трения (такой же режим обеспечивается при износных испытаниях образцов на машине трения). В этом режиме и происходит основной износ трущихся поверхностей [108], причем износ деталей зависит от поверхностной активности моторного масла (его способности создавать граничный смазочный слой). Это и есть смазывающая способность (маслянистость) моторного масла [4]. Смазывающая способность – это взаимное силовое влияние молекул воздуха, смазки и твердого тела на их границе. Экспериментально подтверждено, что смазывающая способность напрямую зависит от коэффициента поверхностного натяжения жидких смазочных масел [42, 37]. Показатель поверхностного натяжения неразрывно связан с явлением адгезии и с краевым углом смачивания поверхности смазочным маслом. Адгезия обычно оценивается работой, которую надо затратить, чтобы разделить жидкость и твердое вещество на поверхности соприкосновения площадью 1 м^2 . Чем больше работа данная работа и меньше показатель поверхностного натяжения жидкой смазки, а также краевой угол смачивания, тем лучше смазочное масло смачивает поверхность трения. [16]. Работа адгезии вычисляется по формуле Дюпре - Юнга:

$$W_a = \sigma (1 + \cos\theta), \quad (2.10)$$

где σ - показатель поверхностного натяжения жидкости на границе с воздухом, Н/м; θ - краевой угол смачивания, град.

Явление уменьшения износа трущихся деталей при облучении смазочного масла ультразвуковыми волнами связано с понижением коэффициента его поверхностного натяжения, что позволяет маслу свободно, без дополнительных усилий, распределяться по трущимся поверхностям, образуя, при том, пленку оптимальной толщины, позволяющей повышать антифрикционную способность контактирующих поверхностей. Зависимость фрикционных характеристик контактирующих деталей от поверхностного натяжения смазывающих масел объясняется молекулярно - кинетической теорией трения [49].

Следует отметить, что кавитационные процессы, происходящие в моторном масле, могли бы принимать непосредственное участие в формировании поверхностей элементов пары трения, однако высокая вязкость масла не позволяет кавитационным процессам реализовываться на расстоянии не превышающем 3 - 5 мм от источника колебаний. Поэтому данными предположениями можно пренебречь.

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания при проведении испытаний образцов пар трения на машинах трения проводится по показателю фактора износа (см. раздел 2.3).

При обработке синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком с частотами диапазоне 17...43 кГц, пониженный, более чем на 5%, коэффициент поверхностного натяжения «облегчает» формирование масляного клина между контактирующими в процессе изнашивания поверхностями «ролика» и «колодки», что дает максимальное снижение фактора износа.

Анализируя формулы, отражающие зависимость коэффициента поверхностного натяжения (σ) от частоты ультразвука (F), можно предположить, что изменение фактора износа для синтетического масла будет повторять зависимость σ от F ультразвука [123].

В этом случае характер зависимости фактора износа пар трения от частоты ультразвука при УЗ обработке синтетического дизельного масла имеет вид (см. табл. 2.1 и рис. 2.11).

Таблица 2.1 - Зависимость Φ от частоты ультразвука для синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

F, кГц	σ , мН/м	$\Phi_{\text{эксп}}$	$\Phi_{\text{расч}}$	Погрешность, %
0-12	34,198	$1,023 \cdot 10^{-10}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$	0,68
13	33,822		$9,7 \cdot 10^{-11}$	
14	33,446		$9,1 \cdot 10^{-11}$	
15	33,07		$8,5 \cdot 10^{-11}$	
16	32,694		$7,9 \cdot 10^{-11}$	
17-43	32,318	$7,35 \cdot 10^{-11}$	$7,3 \cdot 10^{-11}$	-0,68

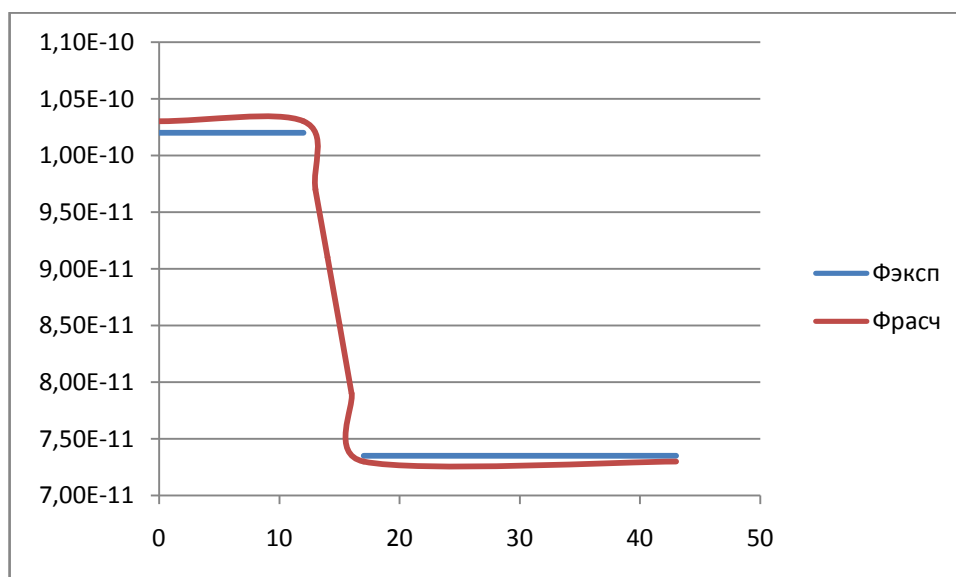


Рисунок 2.11– График зависимости значений фактора износа (Φ) от частоты ультразвука для синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

Тогда уравнение, отражающее зависимость Φ от частоты (F):

$$\Phi = \begin{cases} 1,023 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [0; 12] \\ -0,6 \cdot 10^{-11}F + 1,75 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [12; 17] \\ 0,718 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (2.11)$$

Результаты трибологических испытаний образцов пар трения на машине трения (см. раздел 4.4) подтверждают справедливость данного предположения.

Режим граничного трения накладывает повышенные требования к толщине и целостности пленки смазочного масла, во избежание исчезновения смазочного эффекта и переходу к "пленочному голоданию" [54].

Облучение масла ультразвуком, не только снижает коэффициент поверхностного натяжения, но и повышает температуру моторного масла. Повышение температуры зависит от времени облучения и параметров ультразвука.

С помощью расчетно-экспериментальных методов, автором были выведены аналитические зависимости коэффициента поверхностного натяжения (σ) моторного масла от его температуры [118]. Формулы для определения зависимости σ от T^0 для моторных масел приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Зависимость σ от T^0 для моторных масел

Наименование, класс вязкости и марка масла	Формула для определения σ $\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}$
Моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40	$\sigma = 42,8 - 0,205T$
Моторное «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40	$\sigma = 41,9 - 0,218T$
Моторное «LukoilDIESELOIL» 10W-40	$\sigma = 40,6 - 0,251T$

Результаты проведенных экспериментов, а также выведенные формулы позволяют определять интервал температуры в зоне контакта для наиболее благоприятного проявления объемно - поверхностных свойств пленочных образований для предотвращения возможного нарушения их сплошности. Так, для рассмотренных моторных масел $T_{\text{раб}} \approx 18 - 44^{\circ}\text{C}$.

Выводы по второй главе

1. Описана физика процессов, происходящих в кавитационной области под воздействием акустических волн. Раскрыты понятия: кавитационной прочности жидкости, порогового давления, индекса кавитации, коэффициента использования акустической энергии. Пояснено представление кавитационной области, как своеобразного трансформатора мощности.

2. Разработана качественная модель влияния плотности и вязкости жидкости на разрыв ее сплошности и образование парогазовых пузырьков при акустической кавитации. Приведен алгоритм проверки основных положений модели, что и было успешно сделано (см, раздел 4.2. и пп.5 выводов к четвертой главе).

3. Раскрыт физический смысл влияния акустической кавитации в смазочном масле на основные трибологические характеристики смазок и показатели износа пар трения. Выдвинуто предположение, что изменение показателя фактора износа для синтетического масла будет повторять зависимость коэффициента поверхностного натяжения от частоты ультразвука. Спрогнозированы формулы, отражающие зависимость показателя фактора износа от частоты ультразвука. Выведены аналитические зависимости поверхностного натяжения масел от их температуры. Для используемых моторных масел определены интервалы температуры в зоне контакта для наиболее благоприятного проявления объемно - поверхностных свойств пленочных образований.

4. Раскрыто понятие износа узлов машин и проведена классификация методов его определения. Теоретически обоснована эффективность применения при трибологических испытаниях сравнительной оценки износа пар трения по показателю фактора износа.

3. Общая и частные методики исследований

3.1. Общая структура исследований

Общая структура исследований включает следующие этапы:

- обоснование выбора коэффициента поверхностного натяжения моторных масел критерием оценки изменений трибологических свойств масел при обработке их ультразвуком;
- выбор эффективных методов и разработка лабораторных установок для определения коэффициента поверхностного натяжения моторных масел;
- определение зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры масла;
- лабораторные исследования зависимости коэффициента поверхностного натяжения и температуры моторных масел, обработанных ультразвуком, от параметров ультразвука (частота, мощность), а также от времени обработки, (для ультразвуковой обработки масел должно быть разработано экспериментальное устройства для генерации ультразвука с регулировкой частоты и мощности, а для обработки масел ультразвуком более высокой частоты и мощности может быть использована ванна ультразвуковой очистки);
- лабораторные исследования времени "сохраняемости" эффекта пониженного коэффициента поверхностного натяжения моторных масел, обработанных ультразвуком;
- исследования показателей эффективности кавитационного способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки, предложенного автором [101, 120];
- контрольные триботехнические испытания на машине трения СМТ-1М для оценки зависимости показателей износа пар трения, смазываемых в режиме граничной смазки моторными маслами,

обработанными ультразвуком от параметров ультразвука (частота, мощность);

Исследовались минеральные, полусинтетические и синтетические смазочные масла для дизельных моторов сельскохозяйственных машин и механизмов.

Оценивались: зависимость изменения физико-химических и триботехнических свойств моторных масел, обработанных ультразвуком, и износостойкости, смазываемых пар трения цилиндропоршневых групп автотракторных двигателей, от параметров ультразвука (частота, мощность), времени обработки, а также от конструктивного положения излучателя ультразвука относительно масла.

3.2. Методика выбора коэффициента поверхностного натяжения моторных масел критерием оценки изменения их трибологических свойств

Лабораторные методы оценки влияния свойств смазки на износ пар трения при активации смазочных масел разделяют на:

- 1) прямые (на специальных маслоиспытательных машинах и приборах в условиях реального трения поверхностей пар трения) [103, 117];
- 2) косвенные (смазочные свойства оцениваются различными физико-химическими параметрами без воспроизведения трения между поверхностями пар трения) [157, 17]

При испытаниях косвенными методами могут оцениваться такие физико-химические параметры масла, как: вязкость, краевой угол смачивания, поверхностное натяжение, коллоидная стабильность и др. [4]. Важную роль при проведении косвенных испытаний играет выбор конкретного физико-механического параметра для оценки трибологических свойств моторных масел.

Для выбора оптимального параметра (критерия оценки) необходимо рассмотреть вопросы режимов смазки агрегатов двигателей мобильной сельхозтехники.

Различают граничный, смешанный и гидродинамический режимы смазки. Выделяют также сухое трение, или трение несмазанных поверхностей [148].

Вероятность реализации режимов гидродинамической, смешанной и граничной смазки можно приближенно оценить по значению относительной толщины смазочного слоя (λ) [107]:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}}, \quad (3.1)$$

где h_{min} – толщина смазочного слоя в зоне минимального зазора, мкм; R_{a1} и R_{a2} – величины шероховатости поверхностей трущихся деталей, мкм.

Чем больше величина λ , тем выше вероятность реализации жидкостной смазки и меньше вероятность непосредственного контакта вершин неровностей, контактирующих тел. При $\lambda > 3$ имеет место жидкостной режим смазки, при $\lambda < 1$ – режим граничной смазки, а при $1 < \lambda < 3$ – режим смешанной смазки.

При граничной смазке поверхности сопряжения контактируют между собой. Толщина слоя смазки (h) значительно меньше величины шероховатости поверхностей (R_a). Определяющим свойством смазочных материалов при реализации граничной смазки является поверхностная и химическая активность. Износ поверхностей обусловлен физико-химическими взаимодействиями, происходящими на пятнах фактического контакта поверхностей, и нивелируется граничным слоем смазки [15].

При смешанном (полужидкостном) режиме смазки участки поверхностей находятся в режиме гидродинамической и граничной смазки. Расстояние между поверхностями (h) сравнимо с величиной их шероховатости (R_a). В этом режиме смазки одни участки контакта поверхностей сопряженных тел разделены гидродинамическим

(жидкостным) слоем, а другие участки поверхности - граничным слоем. При этом режиме смазки большое значение имеют как объемная характеристика смазочного материала - его вязкость, так и способность смазочного материала создавать на поверхностях трения прочные граничные слои.

Чем выше доля контакта поверхностей, разделенных гидродинамическим слоем, тем меньше коэффициент трения при смешанной смазке и износ трущихся тел.

При гидродинамическом режиме смазки поверхности сопряжения полностью разделены слоем смазочного материала. Износ поверхностей отсутствует.

Режим смазки определяет также характер разрушения трущихся тел. При жидкостной смазке характер разрушения - фрикционная усталость при упругих деформациях, при смешанной смазке - пластическое деформирование и малоцикловая усталость, при граничной смазке - малоцикловая усталость, абразивное, адгезионное и/или коррозионно-механическое изнашивание, при трении без смазки - абразивное изнашивание и/или схватывание с глубинным вырыванием.

Работа агрегатов автотракторных ДВС и, в частности, пар трения цилиндропоршневой группы ДВС осуществляется в режиме смешанного и граничного трения.

Высокие температуры, вибрация и другие факторы приводят к тому, что преимущественным режимом становится режим граничного трения. В этом режиме и происходит основной износ трущихся поверхностей, причем износ деталей зависит от поверхностной активности моторного масла. Теоретическое обоснование зависимости износа деталей ДВС от коэффициента поверхностного натяжения жидких смазочных масел приведено в разделе 2.4 данной работы.

При облучении масла ультразвуком происходит также повышение температуры масла [46]. Поэтому следует разграничить величины изменения выбранного физико-химического параметра масла, обусловленные

воздействием непосредственно облучения и повышением температуры. Выведено большое количество зависимостей вязкости от температуры [36, 63]. Но ни одна из существующих зависимостей не может быть использована для выработки точных корректирующих или компенсирующих поправок в процессе измерения результата. Вместе с тем, эмпирически доказано, что коэффициент поверхностного натяжения жидкостей имеет простую зависимость от температуры, близкую к линейной [54, 145].

Кроме того, установлено [145, 127, 62], что поверхностное натяжение жидкости является частью понятия внутренней энергии, которую, можно изменять воздействием ультразвука от внешнего источника. При этом коэффициент поверхностного натяжения несложно оценить непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований.

Учитывая все вышеизложенное, критерием для оценки трибологических свойств масла и износа смазываемых пар трения выбран коэффициент поверхностного натяжения масел.

3.3. Методика определения коэффициента поверхностного натяжения моторных масел

Методы определения поверхностного натяжения поверхностей раздела фаз «жидкость – газ» делятся на три группы: статические, полустатические и динамические.

Статическими методами определяется поверхностное натяжение практически неподвижных поверхностей, образованных задолго до начала измерений и поэтому находящихся в равновесии с объемом жидкости.

Динамические методы основаны на том, что некоторые виды механических воздействий на жидкость сопровождаются периодическими растяжениями и сжатиями ее поверхности, на которые влияет поверхностное натяжение. Этими методами определяется неравновесное значение поверхностного натяжения.

Полустатическими называются методы определения поверхностного натяжения границы раздела фаз, возникающей и периодически обновляемой в процессе измерения. Эти методы позволяют определить равновесное значение поверхностного натяжения, если измерения производятся в таких условиях, что время, в течение которого происходит формирование поверхности раздела, значительно больше времени установления равновесия в системе [151].

Основными статическими методами определения поверхностного натяжения являются:

- методы, основанные на измерении размеров капли (пузырька).
- метод капиллярного поднятия;

Основным достоинством методов, основанных на измерении размеров пузырьков или капель, являются независимость найденного поверхностного натяжения от краевых углов смачивания. К недостаткам указанных методов можно отнести длительность единичного измерения поверхностного натяжения и значительную сложность устройств для реализации измерений.

Метод измерения капиллярного поднятия основан на определении разности уровней жидкости в капилляре радиуса r и в широком сосуде.

К недостаткам всех вариантов метода капиллярного поднятия жидкости следует отнести зависимость измеренного поверхностного натяжения от краевого угла смачивания жидкостью материала капилляра, а также высокую погрешность измерения динамического поверхностного натяжения.

Динамические методы определения поверхностного натяжения применяются в основном для изучения и моделирования состояния поверхностных слоев в неравновесном состоянии. К динамическим методам относятся методы капиллярных волн [16, 45] и колеблющейся струи. Данные методы требуют применения сложного и дорогостоящего оборудования.

В лабораторной практике наиболее часто используются полустатические методы определения поверхностного натяжения,

основанные на фиксации условий, при которых система теряет свое равновесие. Данные методы, в отличие от динамических, позволяют получать значения поверхностного натяжения, весьма близкие к равновесным. Преимуществом полустатистических методов, по сравнению с составительскими, является небольшая длительность каждого измерения и простота применяемого оборудования.

К полустатистическим методам определения поверхностного натяжения относятся:

- сталагмометрический метод (метод счета капель);
- метод максимального давления пузырьков воздуха [92];
- методы измерения усилия отрыва предмета от поверхности раздела фаз (отрыва цилиндра - метод Падди, отрыва кольца - метод Дю-Нуи).

Сравнительный анализ полустатистических методов определения коэффициента поверхностного натяжения показал, что для практического определения коэффициента поверхностного натяжения моторных масел оптимальны два метода:

- метод отрыва кольца (метод Дю-Нуи);
- сталагмометрический метод (метод счета капель).

Эффективность данных методов обусловлена тем, что они просты в аппаратной реализации и достаточно точны.

Автором было предложено: проводить определение поверхностного натяжения моторных масел одновременно двумя методами. Это сводит к минимуму погрешности измерений, обусловленные конкретным лабораторным оборудованием). Предложенная методика измерения одновременно двумя методами, представляет исследователю достаточно точный механизм определения оптимального — с точки зрения трибологических характеристик — режима ультразвуковой обработки моторного масла.

Метод отрыва кольца основан на определении коэффициента поверхностного натяжения при помощи измерения силы, которую нужно

приложить перпендикулярно к поверхности жидкости для отрыва различных твердых тел от этой поверхности. Коэффициент поверхностного натяжения определяют, как отношение силы F , измеренной при отрыве тонкого металлического кольца от поверхности жидкости, к длине границ пленки L

Суммарная сила равна:

$$F = \sigma L_1 + \sigma L_2 = \sigma \pi D + \sigma \pi d, \quad (3.2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; L_1 и L_2 – длина внешней и внутренней поверхностей кольца, м; D и d – внешний и внутренний диаметры кольца, м.

Коэффициент поверхностного натяжения σ равен [110]:

$$\sigma = \frac{F}{\pi(D+d)}, \quad (3.3)$$

Известна методика определения σ методом отрыва кольца с помощью устройства с пружиной или пружинного динамометра. Методика требует трудоемкой процедуры калибровки пружины или приобретения дорогостоящего динамометра.

Поэтому для практического определения σ будем использовать простую и оригинальную установку (см. рис 3.1).

Термометром определяется температура в помещении. Штангенциркулем измеряется диаметр кольца (D). В правую чашу весов насыпается песок, чтобы уравновесить чашу с прикрепленным кольцом. На электронных весах взвешивается правая чаша. Записывается ее масса M_1 . Кювета с маслом, при помощи подставки, поднимается до соприкосновения поверхности масла с кольцом. В правую чашу весов медленно насыпается песок до момента отрыва кольца от жидкости. Снова взвешивается правая чаша. Записывается ее масса M .

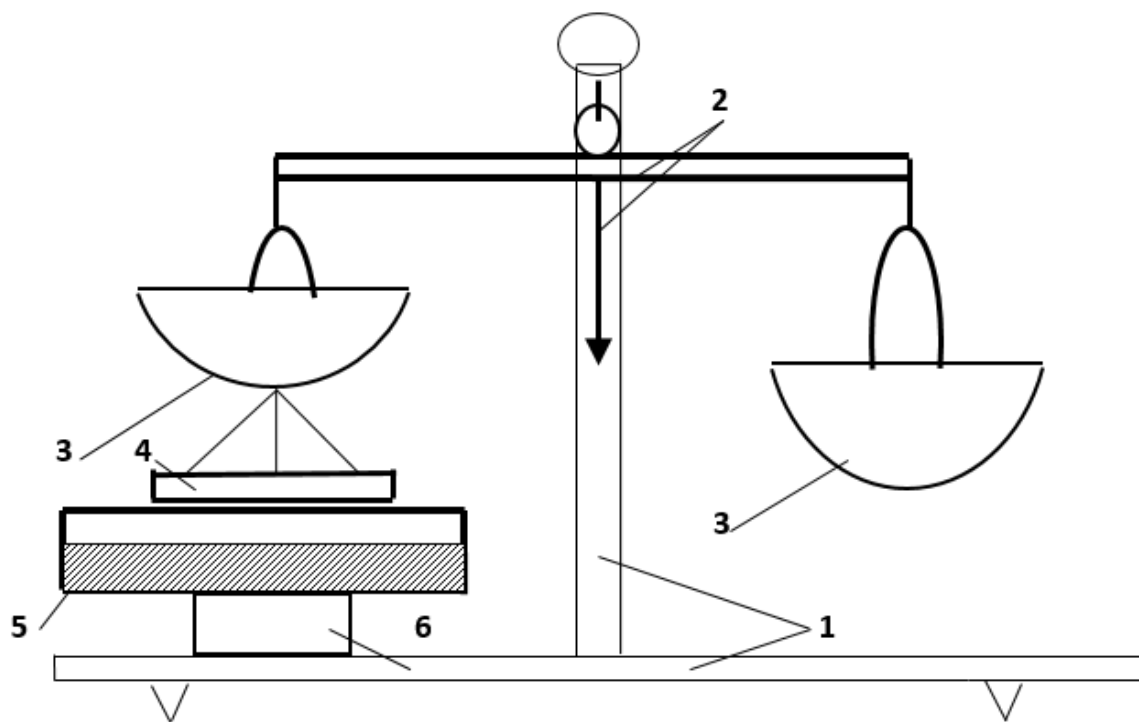


Рисунок 3.1 - Установка для определения σ методом отрыва кольца: 1 - штатив с основанием; 2 - весы аптечные ВР-100, рычажный механизм; 3 - чаши весов; 4 - проволочное кольцо, прикрепленное к чаше нитями в трех точках; 5 - кювета с маслом; 6 - подставка под кювету, плавно меняющая высоту.

Определяется сила отрыва по формуле [110]:

$$F = mg = (M - M_1)g, \quad (3.4)$$

где F - сила, Н; m - масса, кг; g - ускорение свободного падения, м/с^2 .

Определяется σ :

$$\sigma = \frac{(M - M_1)g}{2\pi D}, \quad (3.5)$$

Эксперимент повторяется не менее трех раз [120, 128].

В методе счета капля масло вытекает каплями из сосуда (бюретки). Силу поверхностного натяжения при отрыве капли можно подсчитать, зная радиус перетяжки капли:

$$f = 2\pi r\sigma, \quad (3.6)$$

где r – радиус перетяжки, м; $2\pi r$ - длина окружности перетяжки; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

В момент отрыва капли: $f = mg$,

Отсюда:

$$\sigma = mg/2\pi r, \quad (3.7)$$

Если известны масса капли (m) и r , то можно определить σ .

Проводят сравнения поверхностного натяжения исследуемой жидкости и эталонной. В качестве эталонной жидкости обычно используют воду [147].

Для воды: $m_0 g = 2\pi r_0 \sigma_0$

Для исследуемой жидкости: $mg = 2\pi r \sigma$

Считая $r = r_0$ (приблизительно равным радиусу капилляра бюретки) и, поделив почленно второе равенство на первое, получим: $\sigma / \sigma_0 = m/m_0$ [110]

Откуда:

$$\sigma = \sigma_0 (m/m_0), \quad (3.8)$$

Для практического определения σ используется оригинальная установка, схема которой приведена на рис. 3.2

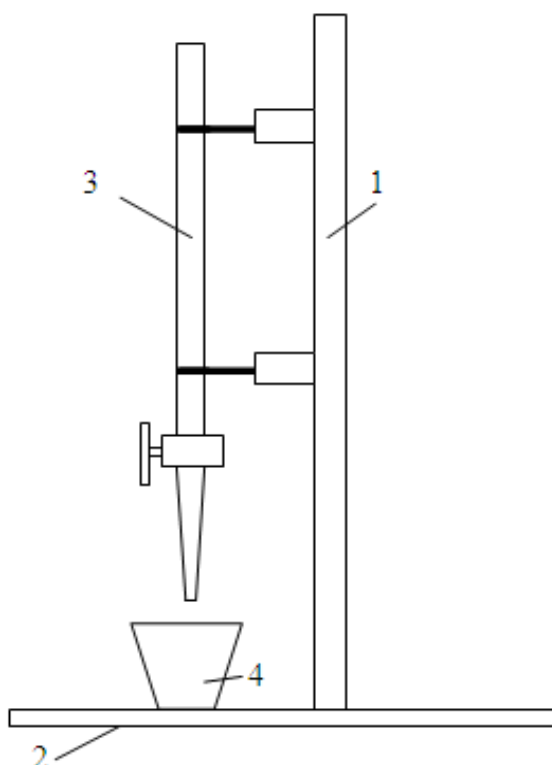


Рисунок 3.2 - Установка для определения σ методом отрыва капель: 1 – штатив с держателями; 2 – основание; 3 – бюретка с краном (диаметр капилляра равен 1,1 мм); 4 – мерный стакан

Для проведения измерений используются также: комнатный термометр, электронные весы DL-120WP фирмы A&D- Япония (дискретность – 0,001гр).

Комнатным термометром измерялась температура в помещении. Взвешивался на электронных весах пустой мерный стакан. Масса стакана записывалась. Скорость истекания жидкости регулировалась краном (таким образом, чтобы в минуту истекало 15-20 капель). Из бюретки в стакан отсчитывалось 50 капель эталонной жидкости (воды). Стакан взвешивался. Разница масс пустого и наполненного стакана составила массу 50 капель воды. Найдена и записана масса одной капли воды. Опыт повторялся три раза. Определена средняя масса капли воды (m_0). Взвешивался на электронных весах пустой мерный стакан. Масса стакана записана. Из бюретки в стакан отсчитывалось 50 капель исследуемой жидкости (моторного масла). Стакан взвешивался. Разница масс пустого и наполненного стакана составила массу 50 капель моторного масла. Находилась и записывалась масса одной капли. Опыт повторялся три раза. Определена средняя масса капли моторного масла (m). Зная σ воды, по формуле (3.8) определялось значение σ масла.

3.4. Методика определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры

Обработка масла ультразвуком приводит не только к изменению его физико-механических параметров, но и к его нагреванию. Вместе с тем, повышение температуры масла (вне зависимости от источника нагревания) приводит к снижению коэффициента поверхностного натяжения [54].

Чтобы провести четкую границу между снижением коэффициента поверхностного натяжения (σ) непосредственно за счет кавитации и снижением σ за счет нагрева, необходимо экспериментально определить зависимость σ масла от его температуры (T °C).

Для данного исследования применялись: емкость с маслом, емкость с водой, нагреватель (газовая горелка), спиртовой термометр. Для измерения коэффициента поверхностного натяжения (σ) двумя способами использовалось оборудование и материалы, приведенные в разделе 3.3 настоящей работы. Производился нагрев моторного масла с использованием водяной бани (емкость с маслом располагалась внутри емкости с горячей водой без соприкосновения стенок и днищ емкостей) до $T^0 = 50^\circ\text{C}$. Температура масла измерялась спиртовым термометром. Проведены измерения σ при каждом уменьшении T^0 масла на 5°C до достижения температуры ($T^0 = 20^\circ\text{C}$). Производились определение σ двумя методами. Данные эксперимента заносились в таблицу. Строились графики зависимости σ масла от температуры.

3.5. Методика экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения масла

Для обработки моторного масла ультразвуком различной частоты (F) и мощности (P) было разработано и изготовлено экспериментальное устройство для генерации ультразвука, предоставленное на рисунке 3.3а. Устройство состоит из блока управления и излучателя ультразвука. Вид излучателя – на рис.3.3 б, а блока управления - на рис. 3.3 в.

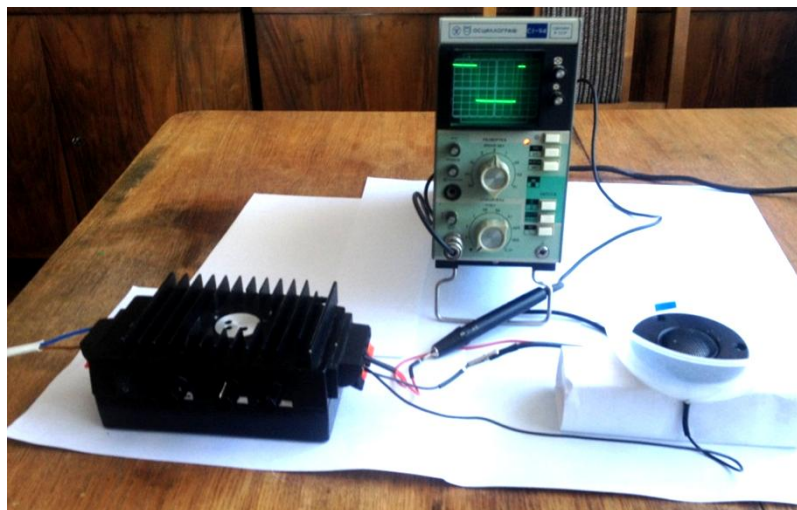


Рис. 3.3 а - Экспериментальное устройство для генерации ультразвука

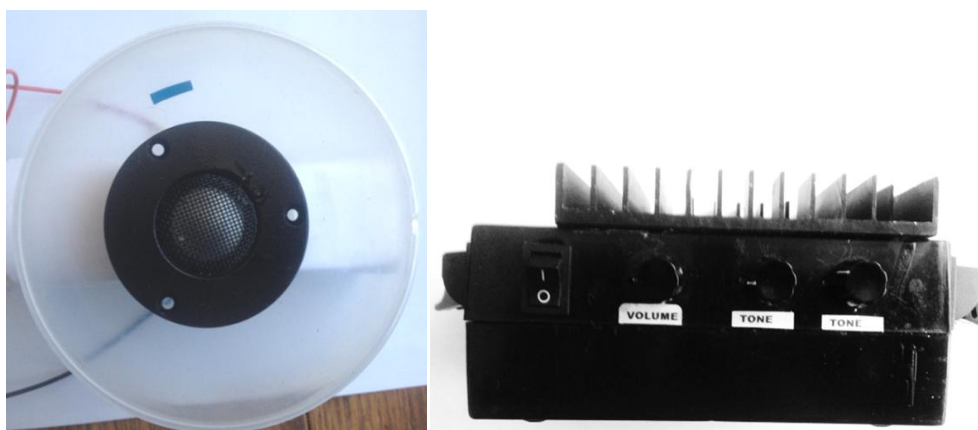


Рис. 3.3 б - Излучатель. Рис. 3.3 в - Блок управления.

Принципиальная схема блока управления приведена на рис. 3.4.

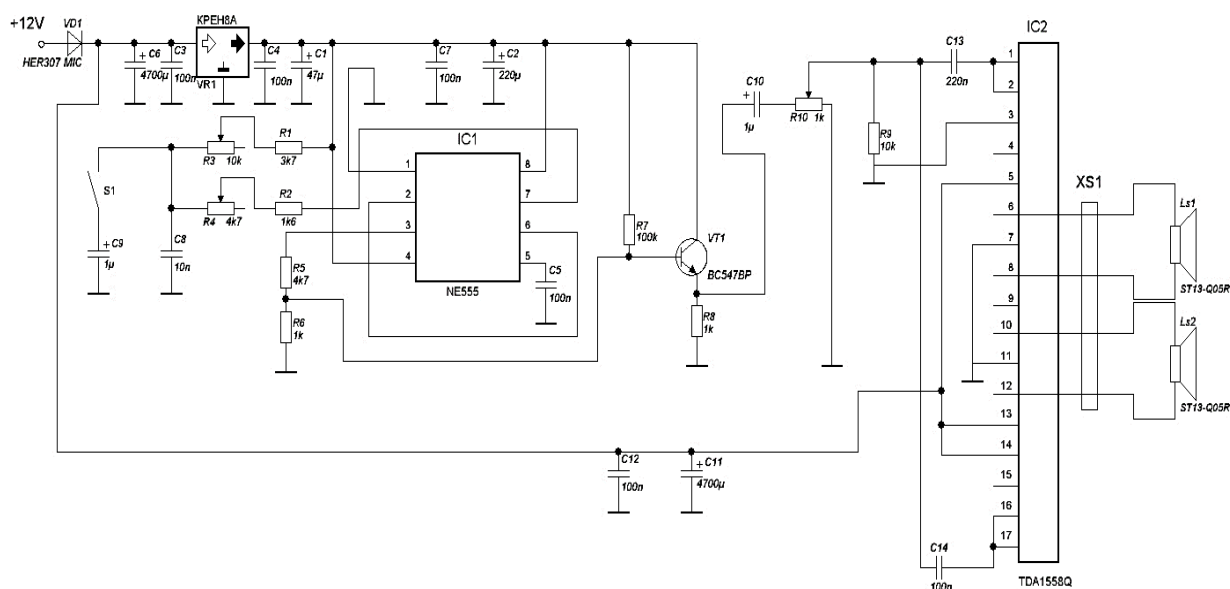


Рисунок 3.4 - Принципиальная электрическая схема блока управления.

Блок управления состоит из следующих основных узлов: генератор прямоугольных импульсов, промежуточный усилитель, выходной усилитель.

Блок управления генерирует плавно регулируемые по частоте сигналы:

- при положении 0 переключателя $S_1(0/1)$ в диапазоне 4...17 кГц;
- при положении 1 переключателя $S_1(0/1)$ в диапазоне 50...200 Гц.

Амплитуд выходного сигнала может плавно регулироваться в диапазоне 0...20В. Мощность сигнала, имеющего форму меандра, определяется по формуле:

$$P = \frac{(0,5U_a)^2}{R_H}, \quad (3.9)$$

где P - мощность, Вт; U_a - амплитуда выходного сигнала, В; R_H - сопротивление нагрузки (излучателя), Ом.

Максимальная мощность ультразвукового сигнала $P_{\max} = 25$ Вт при $U_{a\max} = 20$ В и $R_H = 4$ Ом. Частота и амплитуда (мощность) сигналов контролировались осциллографом С1-94 (см. рис. 3.3а).

Излучатель (высокочастотный динамик Т251.4) расположенный непосредственно в обрабатываемом масле. Вид кюветы для масла со встроенным динамиком приведен на рис 3.3в.

Для обработки масла ультразвуком с параметрами ($P = 30/50$ Вт; $F = 43$ кГц) использовалась ванна ультразвуковой очистки YaXun 3560. Общий вид ванны приведен на рис. 3.5.



Рис. 3.5 - Ванна YaXun 3560

Для определения коэффициента поверхностного натяжения (σ) двумя способами использовалось оборудование и материалы, приведенные в разделе 3.3 диссертации. Для измерения температуры масла использовался спиртовой термометр.

При исследовании зависимости температуры масла от времени обработки его ультразвуком с переменными F и P была установлена амплитуда сигнала 20 В ($P = 25$ Вт) и частота $F = 17$ кГц. Контроль амплитуды и частоты сигнала производился осциллографом С1-94. Наливалось минимально возможное количество моторного масла в кювету со

встроенным излучателем (примерно 15мм над излучателем). Обработывалось масло в течение времени t . Измерялась T^0 масла над излучателем. Масло сливалось. Эксперименты проводились для $t = 60; 90; 120; 180; 240$ с. Категорически не допускалась повторная обработка той же порции масла. Результаты заносились в таблицу. Строился график зависимости T^0 от t обработки.

При исследовании зависимости σ и T^0 масла от t обработки при обработке его ультразвуком с частотой 43 кГц в ванне ультразвуковой очистки YaXun 3560, была установлена мощность излучателя – 50 Вт. В ванну наливалось минимально возможное количество масла (примерно на высоту 15 мм). Масло обрабатывалось в течение времени t . Во время и после обработки масло не перемешивалось. Определялась T^0 масла в зоне над излучателем. Определялся коэффициент σ масла методами отрыва кольца и счета капель. Кольцо располагалось непосредственно над излучателем ванны, а забор масла для бюретки производился шприцом также непосредственно над излучателем. Проводилось по три измерения для каждого метода. Масло из ванны и бюретки сливалось, и они промывались. Эксперимент был проведен для $t = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ с, а также 2, 3, 4, 5 мин. Не допускалась повторная обработка той же порции масла. Результаты заносились в таблицу. Строился график зависимости σ от t обработки (при разных P).

Для определения зависимости σ смазочных масел от частоты и мощности ультразвука использовались экспериментальная установка (см. рис 3.3) а также ванна ультразвуковой очистки (см. рис.3.5). Для определения коэффициента поверхностного натяжения σ двумя способами использовалось оборудование и материалы, приведенные в разделе 3.3. Для измерения температуры использовался спиртовой термометр.

Температура в помещении при проведении эксперимента 210 С. В экспериментальной установке была установлена амплитуда сигнала 20 В ($P = 25$ Вт) Наливалось минимально возможное количество моторного масла в

кювету со встроенным излучателем (примерно 15мм над излучателем). Обработывалось масло в течение времени $t=90\text{с}$, выбранного по результатам предыдущего исследования (в течении этого времени происходит достаточно эффективная кавитация, а масло не успевает нагреться). Масло не перемешивалось. Определялся коэффициент поверхностного натяжения масла последовательно двумя методами. Проводились по три измерения для каждого метода. Масло из кюветы и бюретки сливалось, и они промывались. Эксперимент был выполнен для частот ультразвука равных 10кГц; 12кГц; 15кГц и 17кГц. Результаты заносились в таблицу. Не допускалась повторная обработка той же порции масла. Была установлена амплитуда сигнала 12,7 В ($P = 10\text{Вт}$) и эксперимент был повторен для частот ультразвука равных 10 кГц; 12кГц; 15кГц и 17кГц. Результаты заносились в таблицу.

В ванне ультразвуковой очистки была установлена мощность сигнала 30Вт. Наливалось минимально возможное количество моторного масла в ванну (примерно 15мм. над излучателем). Обработывалось масло в течение времени $t=90\text{с}$, выбранного по результатам предыдущего исследования (в течение этого времени происходит достаточно эффективная кавитация, а масло не успевает нагреться). Масло не перемешивалось. Определялся коэффициент поверхностного натяжения масла последовательно двумя методами. Проводились по три измерения для каждого метода. Масло из ванны и бюретки сливалось, и они промывались. Эксперимент был повторен при мощности ванны 50 Вт. Результаты заносились в таблицу. Строились графики зависимости σ масла от F (при разных P).

Во всех вышеприведенных экспериментах использовались смазочные материалы: - масло моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40 синтетическое; - масло моторное «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 полусинтетическое; - масло моторное «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 минеральное.

Для эксперимента по определению времени сохранения в моторном масле эффекта снижения коэффициента поверхностного натяжения σ , полученного вследствие ультразвуковой кавитации, применялись те же

материалы и оборудование, что и для эксперимента по определению зависимости σ и T^0 от времени t (с) обработки масла ультразвуком (п. 3.4.). Дополнительно применялись электронные часы и 30 пластиковых контейнеров с крышками для хранения порций обработанного масла.

Исследованиям подвергались смазочные материалы: - масло моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40 синтетическое; - масло моторное «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 полусинтетическое

Эксперимент проводился в два этапа: - этап приблизительного определения времени сохранения эффекта; - этап уточнения зависимости изменения коэффициента поверхностного натяжения смазочного масла от времени окончания обработки масла ультразвуком.

На первом этапе эксперимента:

- двумя методами определялся коэффициент поверхностного натяжения σ моторного масла до ультразвуковой обработки, и вычислялось среднее значение $\sigma_{\text{обисх.}}$;
- в ванне ультразвуковой очистки при мощности 50 Вт в течение 120с проводилась обработка нескольких контрольных порций масла, причем каждая порция обработанного масла при помощи шприца помещалась в свой контейнер с метками 0, 1, 2, 3, 4, 5 и т.д., после чего оставшееся в ванне масло сливалось, а ванна очищалась;
- для порций масла из каждого контейнера двумя методами определялся σ , причем из контейнера с меткой «0» сразу после обработки, для контейнера с меткой «1» через сутки, для контейнера с меткой «2» через двое суток и т. д., результаты заносятся в таблицу и вычислялись значения $\sigma_{\text{об0}}, \sigma_{\text{об1}}, \sigma_{\text{об2}}, \sigma_{\text{об3}}$ и т.д.;
- при достижении $\sigma_{\text{об}}$ значения $\sigma_{\text{обисх}}$ первый этап заканчивался.

По результатам первого этапа определялся отрезок времени (в сутках), за который произошло изменение $\sigma_{\text{об}}$ от $\sigma_{\text{об0}}$ до $\sigma_{\text{об исх.}}$

На втором этапе:

- аналогично первому этапу были подготовлены контрольные порции обработанного масла, каждая из которых помещалась в контейнеры с метками $X+4$, $X+8$, $X+12$, $X+16$, $X+20$, $X+24$, $X+28$, $X+32$, $X+36$ и т.д.;
- по истечении времени X суток + 4 часа определялся σ для масла из контейнера с меткой $X+4$ (здесь X – время начала отрезка, определенное по результатам первого этапа), результаты заносятся в таблицу, вычислялось $\sigma_{об\ x+4}$;
- по истечении времени X суток + 8 часов определялось σ для масла из контейнера с меткой $X+8$ и так далее - каждые 4 часа, результаты заносятся в таблицу, вычислялось $\sigma_{об\ x+8}$, $\sigma_{об\ x+12}$, $\sigma_{об\ x+16}$ и т.д.;
- при достижении $\sigma_{об}$ значения $\sigma_{обисх}$, через 4 часа проводилось заключительное измерение и второй этап заканчивался.

3.6. Методика экспериментальной оценки эффективности кавитационного способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки

Исследование проводится для оценки эффективности способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки, предложенного автором [102,118]. Исследованиям подвергалось масло моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40 синтетическое. Для обработки масел использовалась ванна ультразвуковой очистки «YaXun 3560» (China) с частотой ультразвуковых колебаний 43 кГц и изменяемым диапазоном мощности генератора колебаний (30, 50 Вт). В качестве объекта, подвергаемого кавитационному изнашиванию, выбрана фольга алюминиевая толщиной 9 мкм. Использовались также весы электронные DL-120WP фирмы A&D.

Были проведены исследования зависимости кавитационной потери объема металла и концентрации металла в масле от времени обработки ультразвуком. Исследования проводились экспериментально-расчетным методом.

На первом этапе экспериментально определялась зависимость кавитационной потери массы металла от времени обработки для интервалов времени $T = 1, 2, 3, \dots, 10$ мин.

Последовательность действий первого этапа: 1) по шаблону было вырезано 10 прямоугольных листов фольги размером 110*80 мм; 2) ванна заполнялась маслом с высотой слоя 5 мм; 3) подготовленный лист фольги трижды взвешивался на электронных весах и размещался в масле непосредственно над излучателем; 4) устанавливался режим мощности излучателя ванны 50 Вт; 5) излучатель ванны включался на 1 мин; 6) лист вынимался из ванны, промывался от масла и трижды взвешивался на электронных весах; 7) результаты записывались в таблицу; 8) пункты 2 – 7 повторялись для времени работы ванны 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 мин;

На втором этапе, для каждого интервала времени из диапазона от 1 до 10 мин рассчитывались кавитационные потери объема по формуле:

$$\Delta_v = \frac{\Delta_m}{\rho}, \quad (3.10)$$

где Δ_v - кавитационная потеря объема металла; Δ_m - кавитационная потеря массы металла; ρ - плотность металла (алюминия).

На третьем этапе, для каждого интервала времени из диапазона от 1 до 10 мин, рассчитывались количество частиц металла (N) и концентрация металла (n) в масляной суспензии. Количество частиц рассчитывалось по формуле:

$$N = \frac{\Delta_v}{V_q}, \quad (3.11)$$

где Δ_v - кавитационная потеря объема металла, мм^3 ; V_q - средний объем частицы металла, мм^3 .

Объем частицы рассчитывался по предлагаемой авторами формуле:

$$V_q = \frac{4}{3} \pi \cdot \left(h/2 \cdot k_\varepsilon \cdot k_\delta \right)^3, \quad (3.12)$$

где V_q - объем частицы, мм^3 ; h - толщина листа фольги, мм ; k_ε - коэффициент частичной эрозии, обратно пропорциональный числу

«микровзрывов», необходимых для эрозии фольги, соизмеримой по размеру с ее толщиной; k_d – коэффициент кавитационного диспергирования, обратно пропорциональный среднему числу измельчений частицы, уже оторванной от поверхности металла.

В рассматриваемом случае $k_s = 0,1$; $k_d = 0,3$.

Концентрация металла (м^{-3}) в масляной суспензии рассчитывалось по формуле, приведенной в [47]:

$$n = \frac{N}{(V_M + \Delta_v)}, \quad (3.13)$$

где N – количество частиц в масляной суспензии; V_M – объем масла, м^3 .

3.7. Методика эксперимента по определению зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке

Для обработки моторных масел ультразвуком переменной частоты использовалась экспериментальное устройство (см. рис. 3.3 а). Для определения кинематической вязкости моторных масел использовался вискозиметр стеклянный капиллярный ВПЖ-2 (ГОСТ 10028-81) с диаметром капилляра - 1,3 мм. Вискозиметр представлен на рис 3.6.

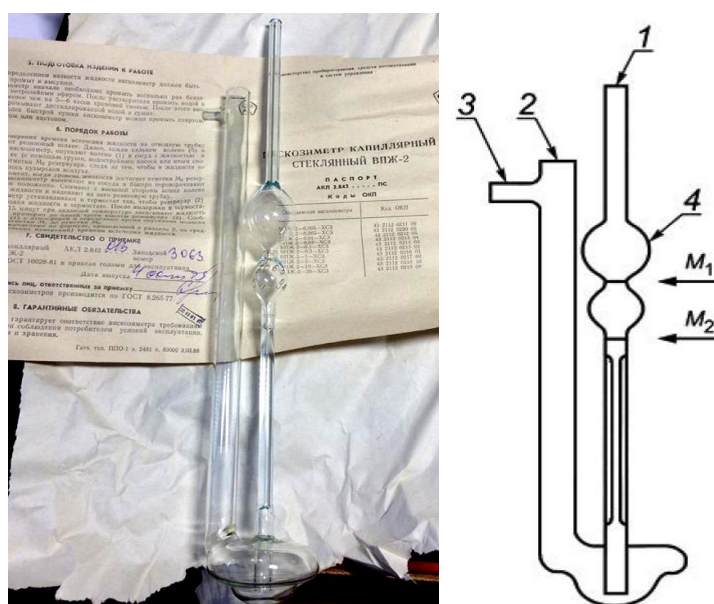


Рисунок 3.6 - Вискозиметр ВПЖ-2: 1 - узкая трубка; 2 – широкая трубка; 3 - отводная трубка; 4 - расширение; M1, M2 - мерные метки.

Для поддержания стабильной заданной температуры исследуемого масла использовался термостат жидкостной лабораторный (жидкость - дистиллированная вода).

Для проведения эксперимента использовались также трубка резиновая с грушей, электронный секундомер (с ценой деления - 0,1 с) и термометр (с ценой деления - 0,1°). Для промывки вискозиметра после измерений использовались: бензин, дистиллированная вода и ацетон. Для сушки использовался фен.

Определение кинематической вязкости моторных масел выполнялось в соответствии с ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. Исследованиям подвергались следующие смазочные материалы: - масло моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40 синтетическое; - масло моторное «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 минеральное.

Для определения вязкости (V): - на отводную трубку 3 вискозиметра надевалась резиновая трубка, далее, зажав пальцем конец трубки 2 и перевернув вискозиметр, опускали конец трубки 1 в контейнер с маслом и засасывали его (с помощью груши) до метки M2, следя за тем, чтобы в жидкости не образовались пузырьки воздуха; - в момент, когда уровень масла достигает метки M2, вискозиметр вынимали из контейнера и быстро переворачивали в нормальное положение, снимали с внешней стороны конца трубки 1 избыток жидкости и надевали на него резиновую трубку с грушей; - вискозиметр на штативе с держателем (на рис. 3.10 не указан) устанавливали в термостат строго вертикально, так, чтобы расширение 4 было ниже уровня жидкости в термостате, выдерживали вискозиметр в термостате (при заданной температуре) не менее 15 минут, для температуры 23° термостат просто не включали; - засасывали грушей жидкость в трубку 1 примерно до 1/3 высоты расширения 4, трубку 1 осторожно отсоединяли от резиновой трубки с грушей; - с помощью секундомера определяли время перемещения мениска жидкости от метки M1 до метки M2, результат заносили в таблицу.

Определение V для масла одного типа и заданной температуры повторяли еще 2 раза (с записью результатов в таблицу). После экспериментов с одним образцом масла, вискозиметр освобождали от масла, промывали бензином, водой и ацетоном, а затем сушили струей воздуха.

Определение V проводилось для масел: без УЗ обработки; с УЗ обработкой ($F=12$ кГц, $P=25$ Вт) и ($F=17$ кГц, $P=25$ Вт).

УЗ обработка масел проводилась в течение 120 с. Порции масла для измерения V забирались в вискозиметр прямо из емкости с излучателем.

Кинематическая вязкость моторного масла вычислялась по формуле:

$$V_{cp} = (g/9,807) \times t_{cp} \times K, \quad (3.14)$$

где V_{cp} – вязкость, мм²/сек; t_{cp} – время истекания жидкости, с (среднеарифметическое из трех измерений); K – постоянная вискозиметра (для ВПЖ-2 с капилляром - 1,31мм - $K=0,3$ мм²/сек²); g – ускорение свободного падения (для Москвы $g = 9,8156$ м/с²).

3.8. Методика проведения триботехнических испытаний на машине трения при обработке моторного масла ультразвуком

Контрольные триботехнические испытания проводились на модернизированной в ИМЭ ФГОБУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева» машине для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1М, представленной на рис. 3.8.

Прототипом модернизированной машины являлась машина трения 2070 СМТ-1 производства ЗАО «Точприбор».

Технические характеристики СМТ-1М: частота вращения вала 75...1500 мин⁻¹ (погрешность - 3%); пределы измерения момента трения пары от 1 до 20 Н·м (с погрешностью измерения - 1%); пределы измерения усилий на образцы от 0,2 до 5 кН, погрешность измерителя – 1%; пределы измерения температуры вблизи зоны контакта образцов от 20 до 155°, погрешность измерения T^0 - 1,5%.

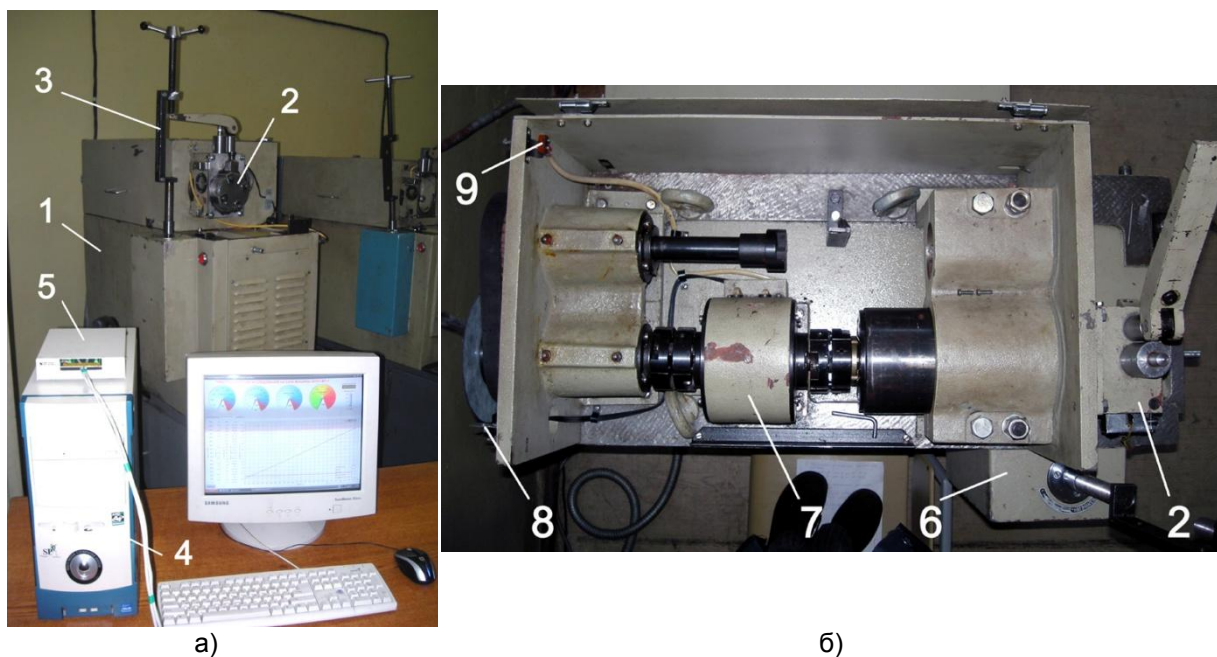


Рисунок 3.8 – Общий вид (а) модернизированной машины 2070 СМТ-1 и основные элементы ее системы автоматизации (б): 1 – станина; 2 – камера испытательная; 3 – механизм нагружения; 4 – компьютер с платой сбора данных NI 6040Е (PCI-MIO-16Е-4); 5 – коммутатор NI SCB-68; 6 – датчик усилия; 7 – датчик момента трения ДИН; 8 – датчик частоты вращения и числа оборотов вала нижнего образца; 9 – датчик положения кожуха

Модернизация машины СМТ-1 заключается в установке электронного блока оперативного сбора и аналого-цифрового преобразования данных от датчиков измерения: частоты вращения вала нижнего образца, усилия, момента трения и температуры, являющегося коммутатором для подключения СМТ-1 к ПК. Установленное на ПК программное обеспечение позволяет оперативно анализировать информацию в режиме реального времени.

Виртуальный прибор системы измерений (рис.3.9) позволяет анализировать динамически поступающую информацию с различных объектов лицевой панели: - цифровые поля (текущие значения усилия, момента трения, температуры и частоты вращения); - графики изменения усилия, момента трения, температуры и частоты вращения во времени; - графики зависимости усилия, момента трения, температуры и частоты вращения от количества циклов (пройденного образцом пути).

Измерение частоты вращения и суммарного числа оборотов подвижного образца реализуются путем программной обработки импульсного сигнала, поступающего от фотопрерывателя.

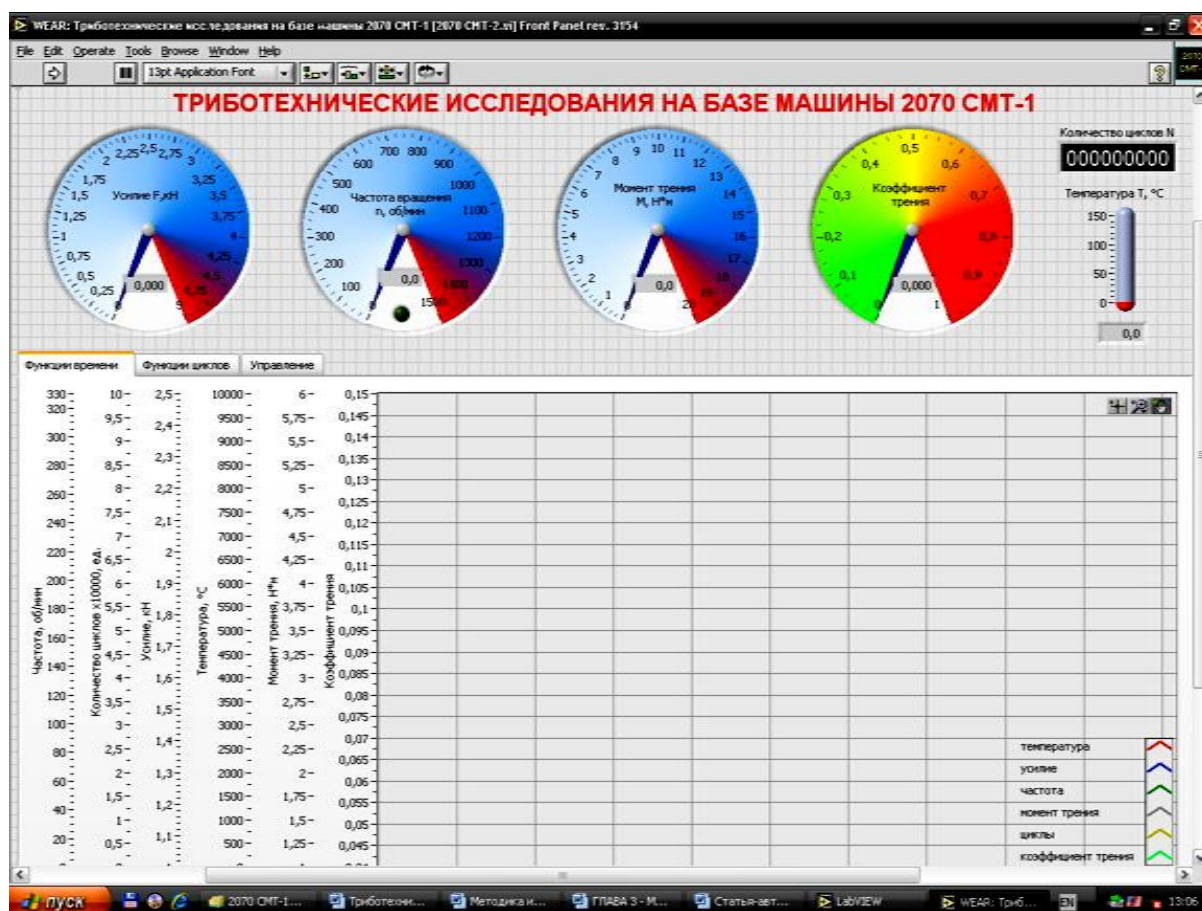


Рисунок 3.9 – Общий вид виртуального прибора

Все приборы были поверены, регистрация показаний проводилась при помощи прикладного программного обеспечения «LabView» компании «National Instruments». Погрешность измерения силы трения, температуры, скорости скольжения и нагрузки соответствовали требованиям ГОСТ 23.224-86.

Триботехнические испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224-86 (экспресс-испытания по группе «А»).

Сущность экспресс-испытаний – определение соотношения интенсивностей изнашивания исследуемых поверхностей, испытываемых при заранее определенных условиях (оптимальной нагрузке).

Испытания проводились в три этапа: - предварительная притирка пар трения проводилась при частоте вращения «ролика» $n = 300$ об/мин,

нагрузка на «колодку» $P = 0,1$ МПа. (в течение 40 мин.); - приработочные испытания; - длительные испытания для определения износа образцов.

Материал образцов пар трения (ролик-колодка): - ролик – сталь инструментальная легированная штамповая Х12Ф1ГОСТ 5950-2000; - колодка – чугун серый СЧ-21 ГОСТ 1412-85.

Образцы были предварительно обработаны таким для того, чтобы контурная поверхность их взаимного прилегания при установке на машине трения составляла не менее 95% номинальной расчетной поверхности контакта.

В качестве смазочного материала при испытаниях использовалось масло моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40 синтетическое. Был установлен режим разовой подачи смазки в картер испытательной камеры для обеспечения граничной смазки.

В процессе триботехнических испытаний образцов масло подвергалось обработке ультразвуком с частотой 8, 12 и 17 кГц и мощностью 25Вт.

Вид изготовленных образцов представлен на рис. 3.10.

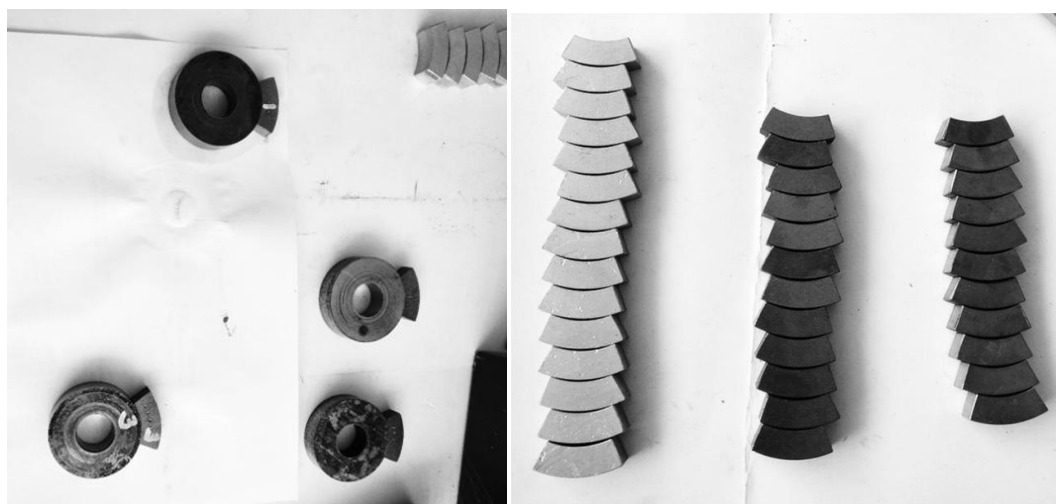


Рис. 3.10а - Ролики с колодками

Рис 3.10б - Колодки

Общий вид испытательной камеры (в открытом состоянии), блока управления ультразвуковыми колебаниями и излучателя ультразвука приведен на рисунке 3.11а. Высокочастотный излучатель типа Т251.4

расположен непосредственно в масле в испытательной камере машины трения (рис. 3.11б).

Испытания на прирабатываемость пар трения проводилось в соответствии с методическими указаниями РД 50-662-88 [68]. При постоянной скорости вращения «ролика» постепенно увеличивалась нагрузка на «колодку» и определялась максимальная предзадирная нагрузка $P_{мп}$, при которой начиналось схватывание образцов. После этого проводилась разгрузка пар трения и определялась оптимальная нагрузка $P_{оп}$, при которой коэффициент трения минимален f_{min} . Результаты испытаний заносятся в таблицу, строился график функции $f(P)$, откуда определялась $f_{min}(P_{оп})$.

Испытания на прирабатываемость пар трения проводились:

- со смазкой не обработанной ультразвуком; - со смазкой обработанной ультразвуком с $F = 8$ кГц и $P = 25$ Вт; - со смазкой обработанной ультразвуком с $F = 12$ кГц и $P = 25$ Вт; - со смазкой обработанной ультразвуком с $F = 17$ кГц и $P = 25$ Вт.



Рис. 3.11а - Общий вид испытательной камеры типа T251.



Рис.3.11б - Высокочастотный излучатель

Длительные износные испытания пар трения, проводились при заданной частоте вращения «ролика» ($n = 380 \text{ мин}^{-1}$) и оптимальной нагрузке $P_{оп}$, полученной по результатам приработочных испытаний. Длительные износные испытания пар трения, проводились при заданной частоте вращения «ролика» ($n = 380 \text{ мин}^{-1}$) и оптимальной нагрузке $P_{оп}$,

полученной по результатам приработочных испытаний. Продолжительность износных испытаний – 8 часов.

После длительных износных испытаний подвижные и неподвижные образцы промывались в ультразвуковой ванне, и, после сушки, взвешивались на аналитических весах фирмы «Sartorius»(Германия) с точностью измерения 0,00001 г в пятикратной повторности.

До начала и после окончания испытаний на прирабатываемость и длительных износных испытаний с рабочих поверхностей образцов снимались профилограммы износа при помощи профилографа-профилометра фирмы «ТэйлорХобсон» (Англия) (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Профилограф-профилометр фирмы «ТэйлорХобсон (Англия)

Профилограммы износа использовались для определения изменений параметров шероховатости в процессе испытаний. Данные о массах образцов до и после испытаний заносятся в протокол испытаний.

Интенсивность изнашивания подвижных и неподвижных образцов пар трения определялась по формуле:

$$I = \frac{W}{N \cdot l}, \quad (3.15)$$

где W – линейный износ образца, м; l – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м; N – число циклов, за каждый цикл поверхности трения образца проходят путь l .

Линейный износ образца W определяется по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (3.16)$$

где ΔG – изменение массы образца при испытании, кг; γ – плотность материала, кг/м³; F_c – контурная площадь контакта образцов, м².

Интенсивность изнашивания пары в целом определялась как сумма интенсивностей изнашивания элементов пары (ролика и колодки).

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания проводилась по показателю фактора износа:

$$\Phi = \frac{I_\Sigma}{P_{on}}, \quad (3.17)$$

где I_Σ – сумма интенсивностей изнашивания элементов пары; P_{on} – оптимальная нагрузка, МПа.

Длительные износные испытания пар трения, проводились:

- со смазкой, не обработанной ультразвуком;
- со смазкой, обработанной ультразвуком с $F = 17$ кГц и $P = 25$ Вт.

4. Результаты экспериментальных исследований

4.1. Результаты экспериментов по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры

Таблицы с результатами экспериментов по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Значения коэффициента σ для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 при изменении T от 20°C до 50°C приведены в табл. Б.1. Значения коэффициента σ для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 при изменении T от 20°C до 50°C приведены в табл. Б.2. Значения σ для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 при изменении T° от 20°C до 50°C приведены в табл. Б.3.

Полученные экспериментально-расчетные данные для трех типов масла (табл. Б.1, Б.2, Б.3) наносились в системе координат $Y0Xc$ последующим определением функциональной зависимости σ от T° . Анализ поля рассеивания расчетно-экспериментальных точек для каждого из масел позволил аппроксимировать характер их распределения линейными моделями вида $y = A - Bx$. При этом среднее среднеквадратическое отклонение для каждой из точек, лежащих на аппроксимированных прямых не превышало $\pm 0,96$ мН/м. Решение системы из двух алгебраических выражений с учетом значений крайних точек полей координат (диапазона от 20°C до 50°C) позволило получить математические выражения для расчета значений коэффициента поверхностного натяжения.

Для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40:

$$\sigma = 42,8 - 0,205T, \quad (4.1)$$

Для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40:

$$\sigma = 41,9 - 0,218T, \quad (4.2)$$

Для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40:

$$\sigma = 40,6 - 0,251T, \quad (4.3)$$

Сводный график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры для минеральных, полусинтетических и синтетических моторных масел представлен на рис. 4.1.

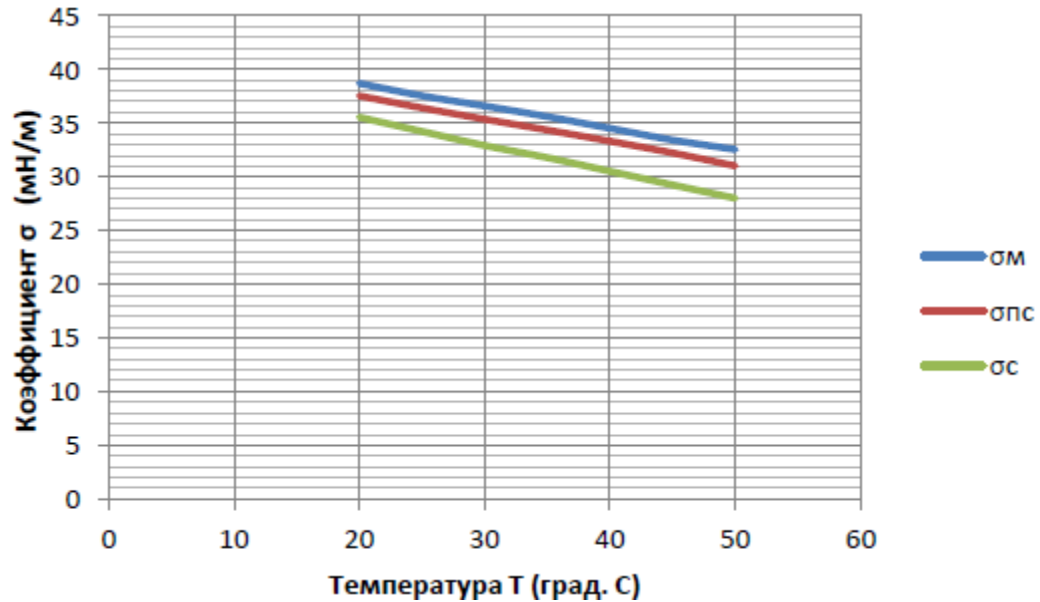


Рисунок 4.1 -Графики зависимости коэффициента поверхностного натяжения σ от температуры для моторных масел: σ_m —для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40; $\sigma_{пс}$ - для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40; σ_c - для синтетического масла «ZICX7 Diesel» 10W-40

Полученные математические выражения позволяют легко разграничить величины изменения коэффициента поверхностного натяжения масла, обусловленные воздействием непосредственно ультразвукового облучения и повышением температуры. Это существенно повышает точность результатов исследований зависимости σ от параметров ультразвука.

4.2. Результаты экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения моторного масла

Таблицы с результатами экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения моторного масла приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Результаты эксперимента по определению зависимости температуры (T^0) моторных масел при обработке их ультразвуком в лабораторной установке от времени обработки приведены в табл. Б.4.

В результате эксперимента выяснено, что для всех масел повышение температуры начинается со времени обработки 120 с.

Результаты экспериментов по определению зависимости температуры и коэффициента поверхностного натяжения масел от времени обработки их ультразвуком в ванне УЗ приведены: - для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 в табл.Б.5; - для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 в табл. Б.6; - для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 в табл.Б.7.

Для каждой точки t из интервала от 0 до 600 с, приведенной в табл. Б.5, вычисляем среднеарифметические значения $\sigma_{\text{ср}}$ (для методов «кольца» и «капель»), а также $\sigma_{\text{об}}$ (обобщенное для двух методов) и среднеквадратическое отклонение. График зависимости $\sigma_{\text{об}}$ от t обработки представлен на рис. 4.2.

Для каждой точки t из интервала от 0 до 600 с, приведенной в табл. Б.6, вычисляем среднеарифметические значения $\sigma_{\text{ср}}$ (для методов «кольца» и «капель»), а также $\sigma_{\text{об}}$ (обобщенное для двух методов) и среднеквадратическое отклонение. График зависимости $\sigma_{\text{об}}$ от t обработки представлен на рис. 4.3.

Для каждой точки t из интервала от 0 до 600 с, приведенной в табл. 4.7, вычисляем среднеарифметические значения $\sigma_{\text{ср}}$ (для методов «кольца» и «капель»), а также $\sigma_{\text{об}}$ (обобщенное для двух методов) и среднеквадратическое отклонение. График зависимости $\sigma_{\text{об}}$ от t обработки представлен на рис. 4.4.

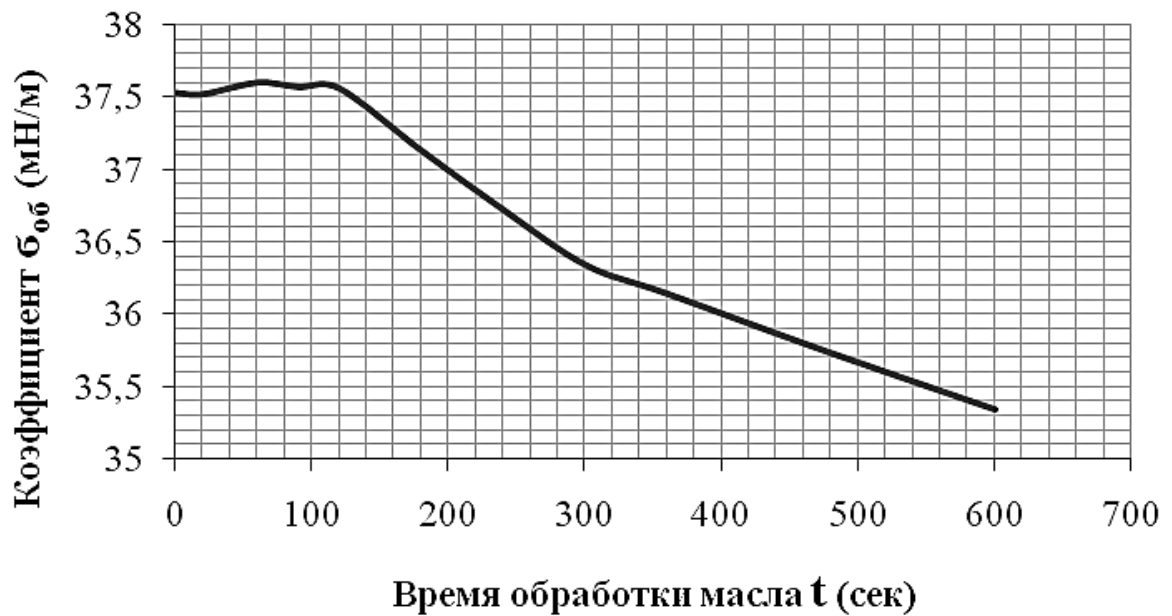


Рисунок 4.2 - График зависимости $\sigma_{об}$ от t для масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40

Максимальное среднеквадратическое отклонение для любой из точек графика не превышает $\pm 0,65$ мН/м.

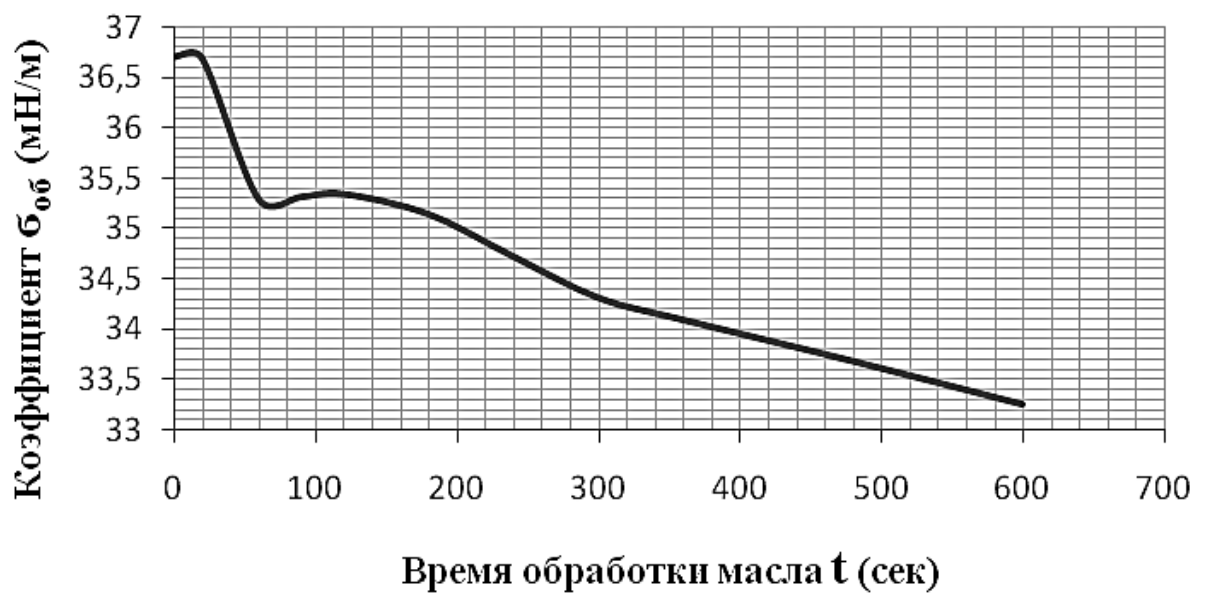


Рисунок 4.3 - График зависимости $\sigma_{об}$ от t для масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40

Максимальное среднеквадратическое отклонение для любой из точек графика не превышает $\pm 0,78$ мН/м.

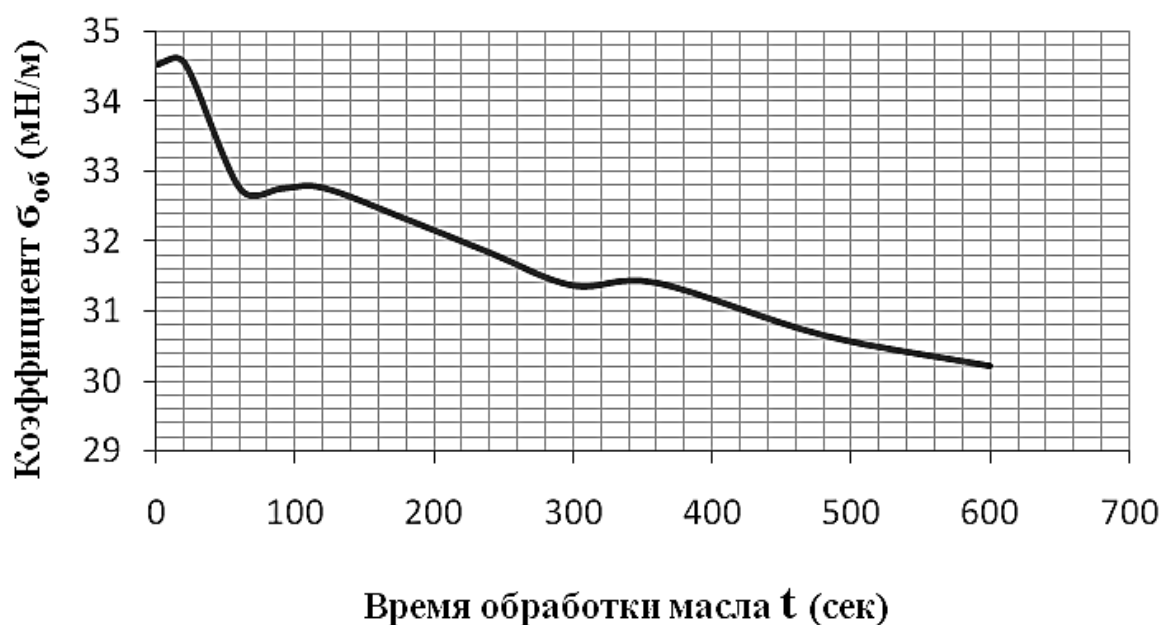


Рисунок 4.4 - График зависимости $\sigma_{об}$ от t для масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

Максимальное среднеквадратическое отклонение для любой из точек графика не превышает $\pm 0,76$ мН/м.

При этом зависимости для синтетического масла были описаны следующими функциями:

$$\sigma = \begin{cases} -0,00075t^2 + 0,017t + 34,53; \forall t \in [0; 60] \\ 34,53; \forall t \in [60; 120] \\ -0,005t + 33,18; \forall t \in [120; 600] \end{cases} \quad (4.4)$$

где t – время, с.

Результаты эксперимента по определению зависимости σ от частоты и мощности ультразвука приведены: - для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 в табл. Б.8; - для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 в табл. Б. 9; для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 в табл. Б. 10.

Сводный график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от частоты ультразвукового сигнала при мощности ультразвука 25 Вт и выше для минерального, полусинтетического и синтетического моторных масел представлен на рисунке 4.5.

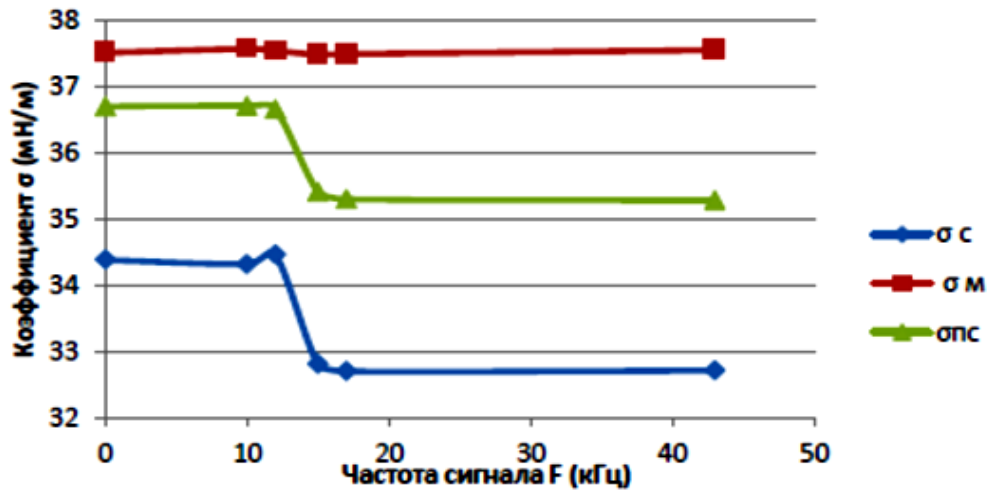


Рисунок 4.5 - Сводный график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от частоты ультразвукового сигнала для минерального, полусинтетического и синтетического моторных масел: σ_c – коэффициент синтетического масла; $\sigma_{пс}$ – коэффициент полусинтетического масла; σ_m – коэффициент минерального масла

Данные зависимости были описаны следующими функциями:

$$\text{для минерального масла} - \sigma = 37,5; \forall F \in [0; 44] \quad (4.5)$$

$$\text{для полусинтетического} - \sigma = \begin{cases} 36,8; \forall F \in [0; 12] \\ -0,283F + 39,94; \forall F \in [12; 17] \\ 35,2; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\text{для синтетического} - \sigma = \begin{cases} 34,3; \forall F \in [0; 12] \\ -0,376F + 38,71; \forall F \in [12; 17] \\ 32,7; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (4.7)$$

При этом проверка по критерию Фишера дает адекватность полученных уравнений, а средняя ошибка аппроксимации составляет величину 3,6%.

Анализ результатов данных исследований показывает: ультразвуковая обработка минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40, применяемая для улучшения трибологических свойств масла, дает нулевой эффект во всех исследованных диапазонах частот и мощностей сигнала; ультразвуковая обработка полусинтетического моторного масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 дает максимальный эффект улучшения трибологических свойств масла (3,81%) в диапазоне частот сигнала от 17 кГц до 43 кГц и мощности ультразвука не менее 25 Вт; ультразвуковая обработка синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 дает

максимальный эффект улучшения трибологических свойств масла (4,89%) в диапазоне частот сигнала от 17 кГц до 43 кГц и мощности ультразвука не менее 25 Вт.

Результаты эксперимента по определению времени сохранения эффекта снижения коэффициента поверхностного натяжения приведены: - для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 в табл. Б.11; - для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 в табл. Б.12.

Для каждой точки t_{xp} из интервала от 0 до 80 ч, приведенной в табл. Б.11, вычисляем среднеарифметические значения σ_{cp} (для методов «кольца» и «капель»), а также $\sigma_{об}$ (обобщенное для двух методов) и среднеквадратическое отклонение. График зависимости $\sigma_{об}$ от t хранения представлен на рис. 4.6.

Максимальное среднеквадратическое отклонение для любой из точек графика не превышает $\pm 0,74$ мН/м.

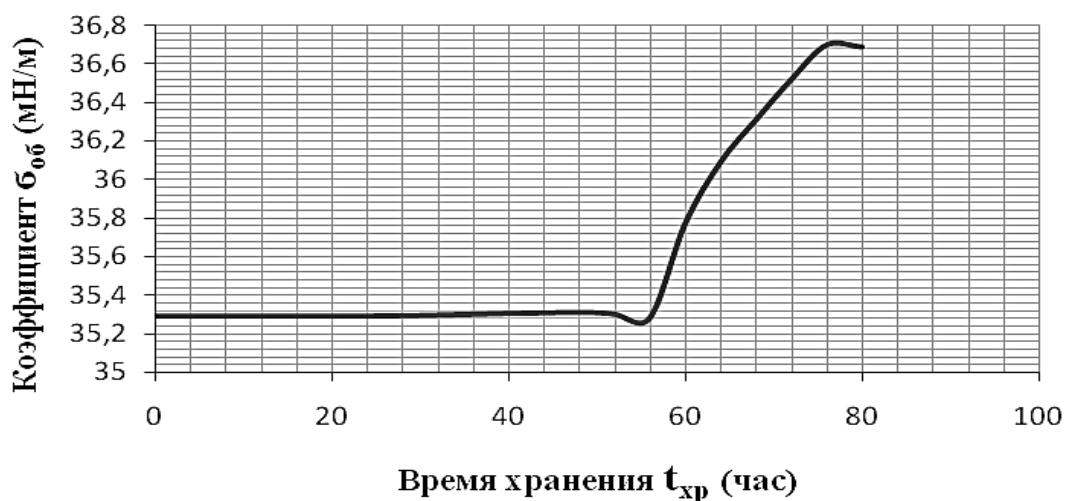


Рисунок 4.6 - График зависимости $\sigma_{об}$ от t хранения для масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40

Для каждой точки t_{xp} из интервала от 0 до 92 ч, приведенной в табл. Б.12, вычисляем среднеарифметические значения σ_{cp} (для методов «кольца» и «капель»), а также $\sigma_{об}$ (обобщенное для двух методов) и среднеквадратическое отклонение. График зависимости $\sigma_{об}$ от t хранения представлен на рис. 4.7.

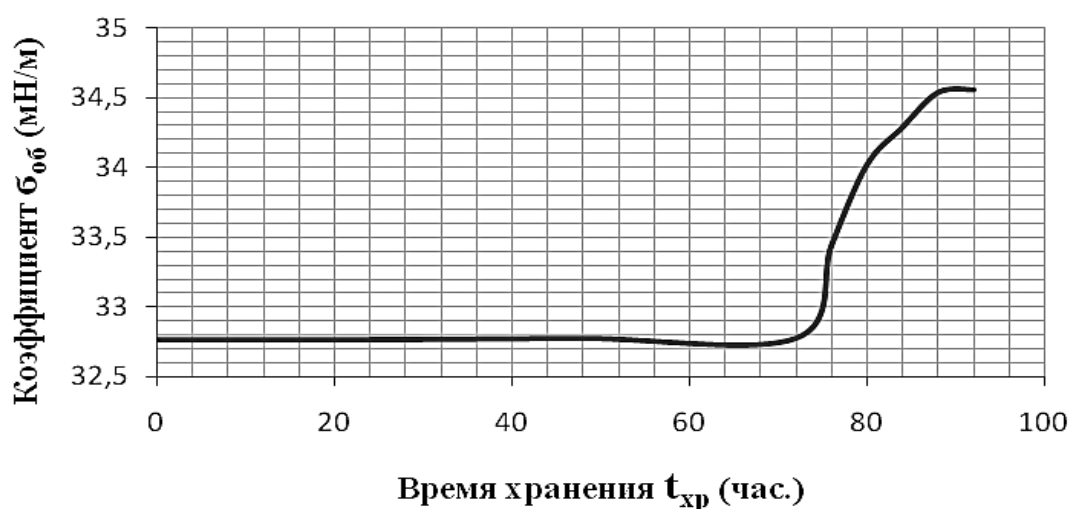


Рисунок 4.7 - График зависимости $\sigma_{об}$ от t хранения для масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

Максимальное среднеквадратическое отклонение для любой из точек графика не превышает $\pm 0,67$ мН/м.

Анализ графика (рис.4.6) показал, что минимальное значение $\sigma_{об}$ для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 сохраняется в течение 56 часов после УЗ обработки. Далее $\sigma_{об}$ начинает повышаться, и к 76 часам достигает значения $\sigma_{обисх}$ (значения $\sigma_{об}$ до обработки масла ультразвуком).

Анализ графика (рис. 4.7) показал, что минимальное значение $\sigma_{об}$ для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 сохраняется в течение 72 часов после УЗ обработки. Далее $\sigma_{об}$ начинает повышаться, и к 88 часам достигает значения $\sigma_{обисх}$ (значения $\sigma_{об}$ до обработки масла ультразвуком).

При этом зависимости были описаны следующими функциями:

$$\text{для полусинтетич. масла} - \sigma = \begin{cases} 35,3; \forall F \in [0; 12] \\ 9,264 \ln(t) - 6,782; \forall F \in [12; 17] \end{cases} (4.8)$$

$$\text{для синтетического масла} - \sigma = \begin{cases} 36,7; \forall F \in [17; 44] \\ 32,7; \forall F \in [0; 12] \\ 4,495 \ln(t) + 17,3; \forall F \in [12; 17] \end{cases} (4.9)$$

где t — время, ч.

Проверка по критерию Фишера показывает адекватность полученных уравнений, а средняя ошибка аппроксимации составляет величину 3,7%.

Таким образом, можно заключить, что для синтетического масла, эффект сохраняется на 16 часов дольше, чем для полусинтетического.

Это показывает, что применение синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40, периодически обрабатываемого ультразвуком, для повышения долговечности агрегатов мобильной сельскохозяйственной техники позволяет производить периодическую обработку смазочного масла, в 1,29 раз реже, что снижает затраты.

Результаты эксперимента по оценке зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б (табл. Б.13).

Анализ результатов эксперимента показывает, что при ультразвуковой обработке минерального масла (частота УЗ 12 и 17 кГц, $T = 23^0$ и 40^0), вязкость изменялась не более, чем на 0,3%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 12 кГц, $T = 23^0$), вязкость уменьшилась на 2,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 12 кГц, $T = 40^0$), вязкость уменьшилась на 1,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 17 кГц, $T = 23^0$), вязкость уменьшилась на 8,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота 17 кГц $T = 40^0$), вязкость уменьшилась на 7,6%.

4.3. Результаты экспериментальной оценки эффективности способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки

Сущность способа состоит в том, что процесс образования мелкодисперсных частиц происходит непосредственно в модифицируемой смазочной жидкости под действием кавитационной эрозии, вызываемой акустической вибрационной кавитацией, при этом изнашиваемые кавитацией материалы находятся в зоне максимальной интенсивности кавитации.

Визуальный эффект кавитационного износа фольги в ванне при установленной мощности излучения генератора 50 Вт представлен на рис.4.8. График зависимости кавитационной потери металла (Δ_v) от времени обработки масла ультразвуком приведен на рис.4.9, а зависимости

концентрации металла в масляной суспензии от времени обработки масла ультразвуком – на рис.4.10.

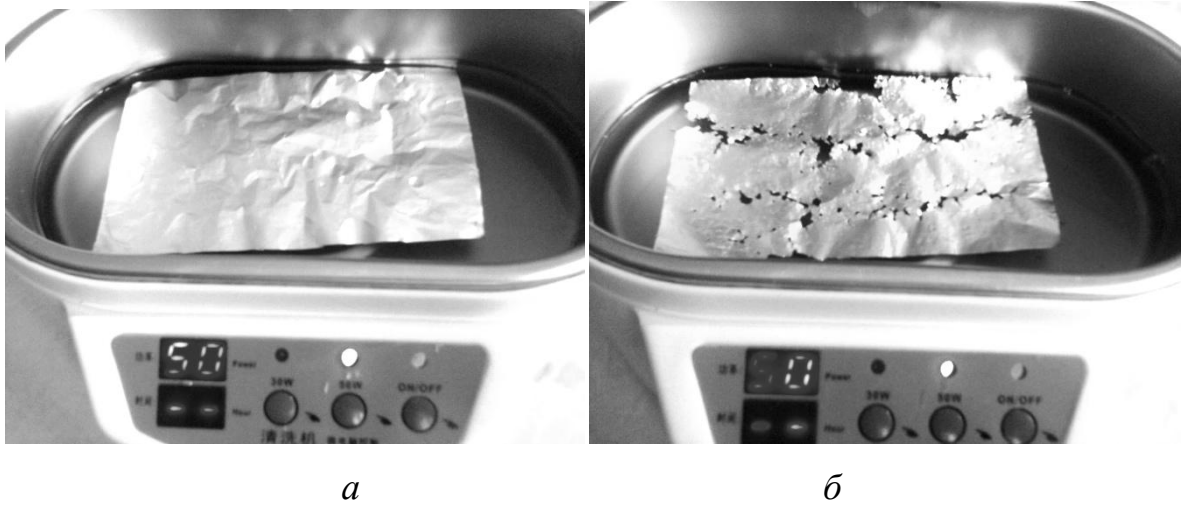


Рисунок 4.8 – Ультразвуковая ванна, наполненная маслом, и с фольгой, расположенной над излучателем: а – фольга до обработки; б – фольга после обработки в течение 5 минут

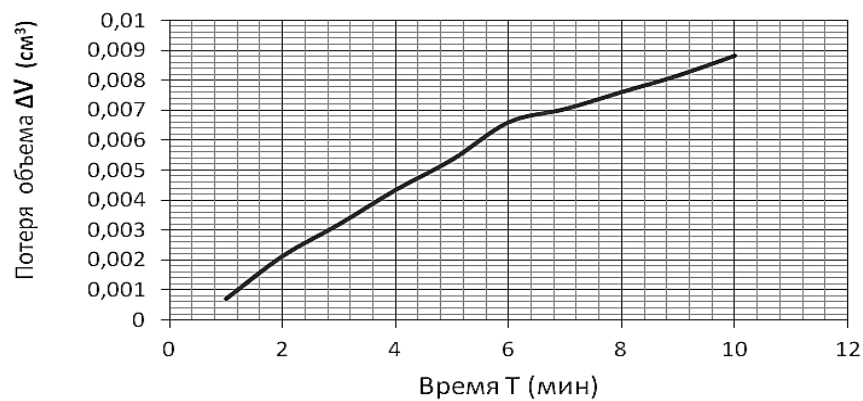


Рисунок 4.9 - График зависимости кавитационной потери металла Δ_v от времени обработки масла ультразвуком

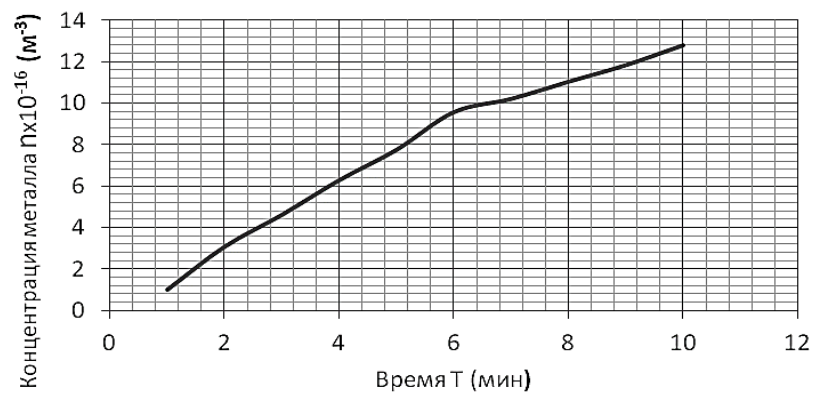


Рисунок 4.10 - График зависимости концентрации металла в суспензии от времени обработки масла ультразвуком

Результаты исследования зависимости потери объема металла и концентрации металла в масле от T обработки показали эффективность метода даже при небольшой мощности ультразвукового излучения.

Зависимость, описывающая потери объема металла от времени обработки ультразвуком, может быть представлена следующим уравнением:

$$\Delta_v = -0,000066 \cdot T^2 + 0,0016 \cdot T - 0,00082, \quad (4.10)$$

При этом проверка по критерию Фишера дает адекватность полученного уравнения, а средняя ошибка аппроксимации составляет величину 3,2%.

Для автоматизированной реализации способа предлагается устройство, схема которого представлена на рисунке 4.11 [101, 120].

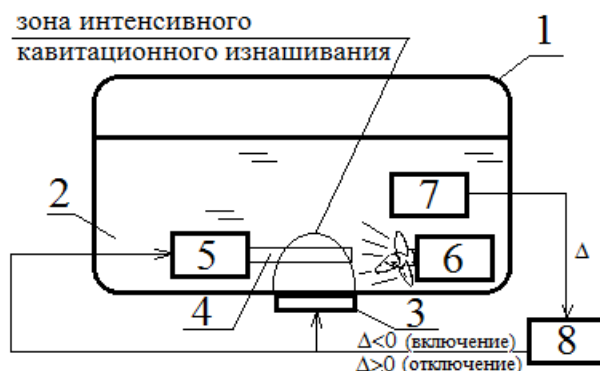


Рисунок 4.11 - Схема устройства для внесения мелкодисперсных присадок в масло: 1 – емкость; 2 – модифицируемая жидкость; 3 – акустический излучатель; 4 – материалы, подвергающиеся кавитационной эрозии; 5 – механизм подачи диспергируемых материалов в область интенсивной кавитации; 6 – механизм перемешивания жидкости; 7 – блок для определения физико-механических и/или химических характеристик модифицируемой жидкости; 8 – узел включения/отключения

Материалы, диспергируемые в жидкость, могут вноситься в определенной последовательности и объеме (массе) – в зависимости от требуемых физико-механических и химических характеристик жидкости (коэффициента трения, теплопроводности, вязкости и пр.) путем их поочередного размещения в зоне максимальной интенсивности кавитации и нахождения в ней в течение определенного времени, определяемого амплитудой колебаний излучателя, частотой ультразвука в кавитационной

области, расстоянием от излучателя, температурой и газосодержанием жидкости, составом и концентрацией растворенных в ней примесей.

Предлагаемый способ позволяет резко упростить процесс получения и внесения в жидкости, в частности в масла и смазки, мелкодисперсных металлических и неметаллических материалов с целью изменения физико-механических и химических свойств смазочных жидкостей.

4.4. Результаты триботехнических испытаний на машине трения при обработке моторного масла ультразвуком

Результаты определения весового износа образцов при длительных износных испытаниях приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Профилограммы шероховатости образцов до и после износных испытаний и таблицы шероховатостей приведены в ПРИЛОЖЕНИИ В.

При приработочных испытаниях значения момента трения и коэффициента трения считывались в режиме реального времени с диалогового окна экрана (по три значения для каждого значения нагрузки P). Графики зависимости среднеарифметических значений момента трения M от нагрузки P в режиме повышения нагрузки приведены на рис. 4.12 и 4.13. Графики зависимости среднеарифметических значений коэффициента трения f от нагрузки P в режиме повышения нагрузки приведены на рис. 4.14 и 4.15.

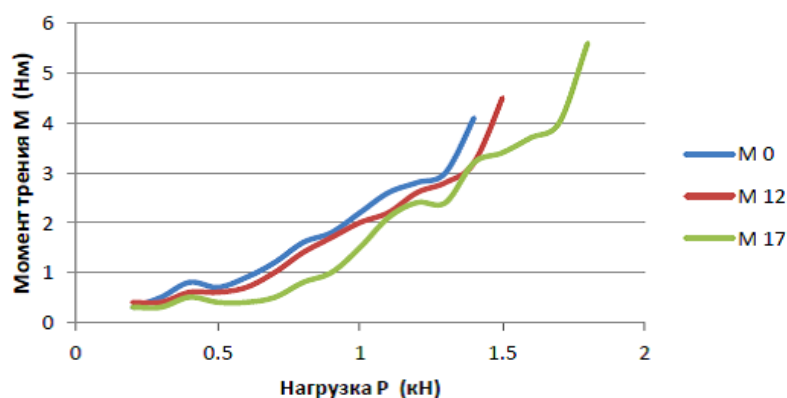


Рис. 4.12. График зависимости момента трения M от нагрузки P при повышении нагрузки: M_0 — кривая без обработки ультразвуком; M_{12} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 12 кГц; M_{17} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 17 кГц

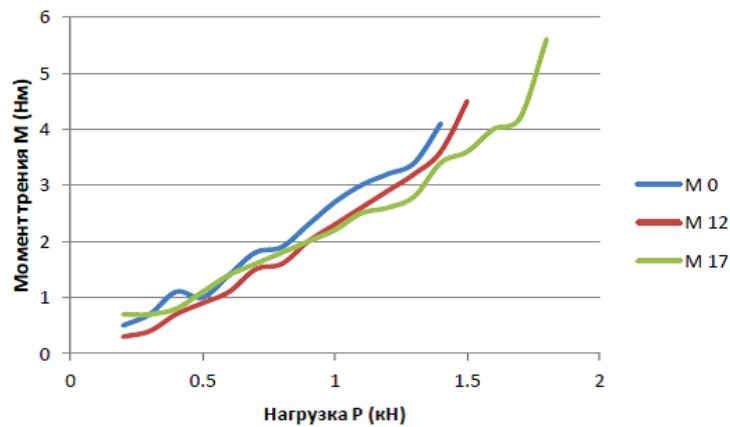


Рис. 4.13 - График зависимости момента трения M от нагрузки P при понижении нагрузки: M_0 — кривая без обработки ультразвуком; M_{12} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 12 кГц; M_{17} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 17 кГц.

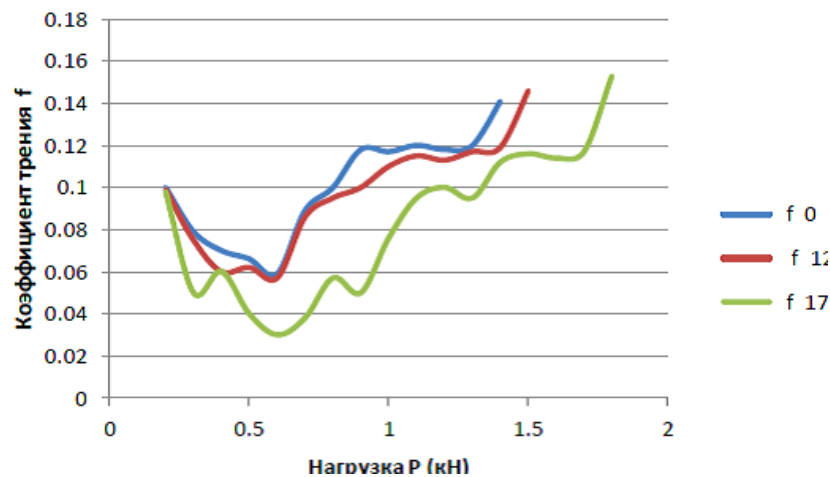


Рис. 4.14 - График зависимости коэффициента трения f от нагрузки P при повышении нагрузки: f_0 — кривая без обработки ультразвуком; f_{12} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 12 кГц; f_{17} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 17 кГц

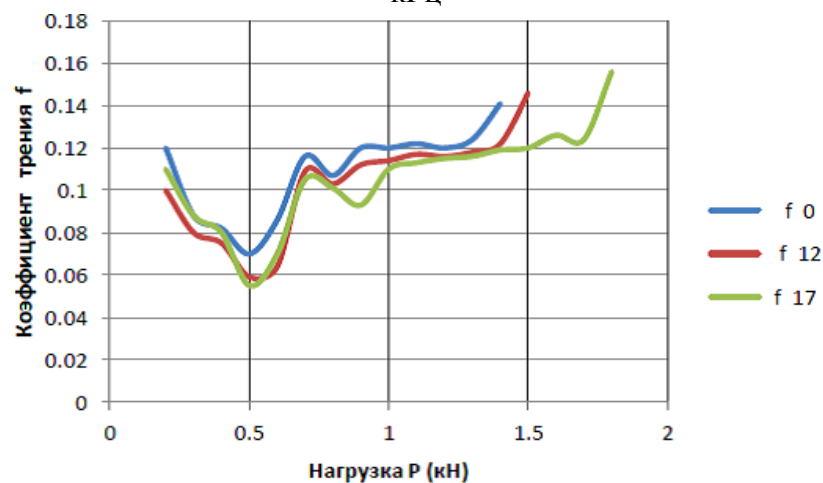


Рис. 4.15 - График зависимости коэффициента трения f от нагрузки P при понижении нагрузки: f_0 — кривая без обработки ультразвуком; f_{12} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 12 кГц; f_{17} — кривая при обработке ультразвуком с частотой 17 кГц

На приведенных рисунках зависимости для частоты (F) - 8кГц не представлены, так, как при обработке масла ультразвуком с F - 8 кГц значения M и f практически идентичны значениям M и f без обработки масла.

Анализ полученных данных позволил определить максимальную предзадирную нагрузку $P_{\text{м.п.}}$, при которой наблюдался резкий рост момента и коэффициента трения, а также оптимальную нагрузку $P_{\text{оп}}$, при которой наблюдается локальное снижение коэффициента трения f_{min} (локальный минимум).

Таблица 4.1–Итоговые результаты приработочных испытаний

Частота ультразвука, кГц	$P_{\text{м.п.}}$, кН (МПа)	$P_{\text{оп}}$, кН (МПа)	f_{min}
0	1,4 (9,33)	0,8 (5,33)	0,107
8	1,4 (9,33)	0,8 (5,33)	0,108
12	1,5 (10,0)	0,8 (5,33)	0,103
17	1,8 (12,0)	0,9 (6,00)	0,093

Сравнительный анализ данных табл. 4.1 показал следующее:

- при обработке масла ультразвуком с F - 17 кГц предзадирная нагрузка увеличилась на 22,2%, коэффициент трения f_{min} уменьшился на 13,1%, а соответствующая ему оптимальная нагрузка увеличилась на 12,5% по сравнению с испытаниями с использованием необработанного ультразвуком масла;
- при обработке масла ультразвуком с F - 12 кГц предзадирная нагрузка увеличилась на 6,5%, а коэффициент трения уменьшился на 3,6%, при этом соответствующая ему оптимальная нагрузка не изменилась по сравнению с испытаниями с использованием масла, необработанного ультразвуком.

- при обработке масла ультразвуком с $F = 8$ кГц предзадирная нагрузка, коэффициент трения и соответствующая ему оптимальная нагрузка практически не изменились.

Профилограммы поверхностей трения снимались для образцов пар трения до и после испытаний без обработки масла и при обработке масла ультразвуком с $F = 17$ кГц. Снятые показатели шероховатости рабочих поверхностей (показатель нерегулярной шероховатости поверхности R_a и показатель высоты пиков микронеровностей поверхности R_{max}) для образцов, проходящих испытания, до и после испытаний приведены в табл. В. 1.

Анализ профилограмм до и после испытаний на прирабатываемость показывает, что наблюдается снижение значения параметра шероховатости R_a для всех образцов: при отсутствии обработки ультразвуком масла — на 4,7 % и 12,6%; при обработке ультразвуком масла на частоте 17 кГц — на 50% и 78,2% для ролика и колодки, соответственно. При этом происходит увеличение параметра R_{max} для неподвижных образцов (колодок), что свидетельствует о наличии схватывания (предзадирного состояния) материалов образцов. Так для колодки после испытания на прирабатываемость при обработке масла ультразвуком на 17 кГц параметр R_{max} увеличился в 1,84 раза, а для неподвижного образца без обработки увеличение составило 1,1 раза.

Большее значение R_{max} для неподвижного образца, испытанного при обработке масла ультразвуком, связано с достижением предзадира при большей нагрузке по сравнению с образцом, испытанным без обработки масла.

При анализе результатов испытаний установлено следующее:

- 1) Определены оптимальные значения параметров ультразвукового излучения (частота 17 кГц при мощности источника ультразвука 25 Вт), воздействующего на моторное масло, при которых существенно улучшалась износостойкость испытываемых пар трения в режиме граничной смазки (предзадирная нагрузка увеличилась на 22,2%,

коэффициент трения уменьшился на 13,1%, оптимальная нагрузка увеличилась на 12,5%).

- 2) Определены оптимальные значения параметров ультразвукового излучения (частота 17 кГц при мощности источника ультразвука 25 Вт), воздействующего на моторное масло, при которых существенно улучшалась износостойкость испытываемых пар трения в режиме граничной смазки (предзадиная нагрузка увеличилась на 22,2%, коэффициент трения уменьшился на 13,1%, оптимальная нагрузка увеличилась на 12,5%).

3) Наблюдается снижение значения параметра шероховатости R_a , при этом при отсутствии обработки ультразвуком масла — на 4,7% и 12,6%; при обработке ультразвуком масла на частоте 17 кГц — на 50% и 78,2% для ролика и колодки, соответственно. При этом для колодки после испытания на прирабатываемость при обработке масла ультразвуком частотой 17 кГц параметр R_{max} увеличился в 1,84 раза, а для неподвижного образца без обработки — в 1,1 раза. Большее значение R_{max} для неподвижного образца, испытанного при обработке масла ультразвуком, связано с достижением предзадира при большей нагрузке по сравнению с образцом, испытанным без обработки масла. Не исключено, однако, что акустическая кавитация в моторном масле могла непосредственно участвовать в формировании поверхностей трения ролика и колодки, поскольку источник ультразвукового излучения находился непосредственно в испытательной камере. Исходя из вышеизложенного, было принято решение проводить длительные износные испытания со смазкой образцов, не обработанной ультразвуком и со смазкой, обработанной ультразвуком с частотой 17 кГц.

Длительные износные испытания проводились в течение 8 часов. Число циклов при испытаниях без обработки смазки равно 144487. Число циклов при испытаниях с обработкой смазки ультразвуком равно 144493.

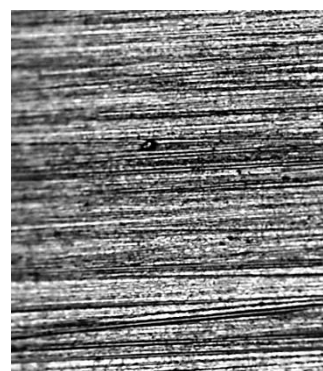
Результаты взвешивания образцов пар трения до и после длительных испытаний приведены в таблице Б. 14. Показатели износостойкости, оцененные по результатам длительных износных испытаний образцов, приведены в таблице 4.2.

Анализ данных таблицы Б. 14 позволяет сделать вывод о высокой эффективности обработки моторного масла ультразвуком частотой 17 кГц при мощности генератора 25 Вт – средняя масса образцов, изнашиваемых в необработанном масле, относительно средней массы образцов, подвергавшихся изнашиванию в обработанном ультразвуком масле, меньше на величину 10,14% для роликов и на 18,94% для колодок.

Фотографии поверхностей пар трения после длительных износных испытаний представлены на рисунках 4.16 и 4.17.

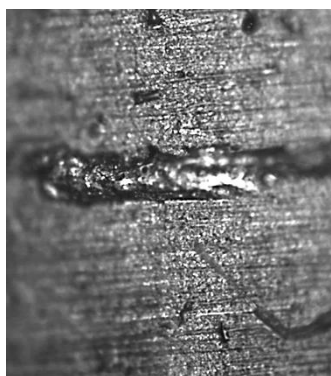


а)

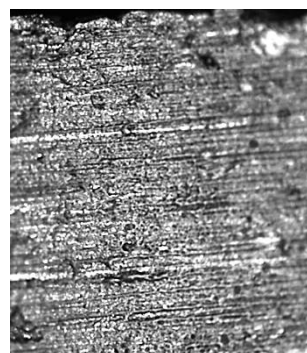


б)

Р и с у н о к 4.16 - Ролик после испытаний: а) без обработки масла ультразвуком; б) с обработкой масла ультразвуком частотой 17 кГц



а)



б)

Р и с у н о к 4.17 - Колодка после испытаний: а) без обработки масла ультразвуком; б) с обработкой масла ультразвуком частотой 17 кГц

Отсутствие следов «задигов» и на колодке, и на ролике при обработке моторного масла ультразвуком свидетельствует о протекании процесса изнашивания при постоянном присутствии слоя смазки между ними.

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания при проведении испытаний образцов пар трения на машине трения СМТ - 1М (см. п. 3.8 работы), проводилась по показателю фактора износа:

Анализ изменения показателя фактора износа Φ в зависимости от частоты обработки смазочного масла показал, что ультразвуковая (УЗ) обработка оказывает положительное влияние на его уменьшение, что, скорее всего, связано со снижением коэффициента поверхностного натяжения смазочного масла. Пониженный, более чем на 5%, коэффициент поверхностного натяжения «облегчает» формирование масляного клина между контактирующими в процессе изнашивания поверхностями «ролика» и «колодки». При этом, рекомендуемой частотой обработки для синтетического смазочного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 может быть любая частота из широкого диапазона 17...43 кГц.

Сравнительный анализ показателей износа, при длительных износных испытаниях образцов (табл. 4.2), показали, что фактор износа при обработке синтетической смазки ультразвуком с частотой 17 кГц уменьшился на 28%.

Т а б л и ц а 4.2 - Оценка показателей износостойкости

Образец	Износ, г	Нагрузка $P_{опт}$, МПа	Частота ультразвуковой обработки, кГц	Показатели износостойкости			
				I_P	I_H	I_Σ	Φ
Ролик	0,00148	5,3	-	$1,232 \cdot 10^{-11}$	$0,53 \cdot 10^{-9}$	$0,542 \cdot 10^{-9}$	$1,023 \cdot 10^{-10}$
Колодка	0,00132						
Ролик	0,00133	6,0	17,0	$1,107 \cdot 10^{-11}$	$0,43 \cdot 10^{-9}$	$0,441 \cdot 10^{-9}$	$0,735 \cdot 10^{-10}$
Колодка	0,00107						

На основании вышесказанного в формулу (3.17) можно ввести поправочный коэффициент для показателя фактора износа Φ с целью учета обработки смазочного масла ультразвуком на частотах более, чем 17 кГц:

$$\Phi = 0,718 \frac{I_{\Sigma}}{P_{on}}, \quad (4.11)$$

Вероятно, что данный эффект будет наблюдаться для целого ряда синтетических смазочных масел.

Рабочие поверхности образцов до длительных износных испытаний и после подвергались профилографированию с целью исследования изменения параметров шероховатости и определения площади износа в процессе испытаний.

Профилограммы поверхностей при длительных износных испытаниях с УЗ обработкой масла ($F = 17$ кГц) представлены на рис. В. 1 и В. 2.

Снятые показатели шероховатости рабочих поверхностей: показатель нерегулярной шероховатости поверхности (R_a) и показатель высоты пиков микронеровностей поверхности (R_{max}) для образцов, проходящих испытания, до и после испытаний приведены в табл. В. 2.

Сравнивая профилограммы до и после длительных износных испытаний, можно сделать вывод о том, что наблюдается снижение значения параметра шероховатости R_a для колодок без обработки и с обработкой ультразвуком на 8,7% и 14,4%, соответственно. Для роликов, испытанных в масле без обработки ультразвуком, прослеживается возрастание данного параметра на 15,4% и понижение на 2,2% для роликов при испытаниях в масле, обрабатываемом ультразвуком.

Параметр R_{max} повышается для всех пар трения, испытанных на износостойкость без обработки ультразвуком: для колодки повышение составляет в 1,26, для ролика – в 1,45 раза. Для пар трения, испытанных на износостойкость с обработкой масла ультразвуком, R_{max} для колодки снижается в 1,67 раза, для ролика – повышается в 2,1 раза.

Изменение параметров шероховатости при триботехнических испытаниях связаны со сложными процессами износа, а также влияния физико-механических свойств испытуемых материалов и внешних воздействий. При испытаниях материалов, имеющих разную микротвердость, происходит внедрение микронеровностей более твердого материала в мягкий, что и приводит к изменению параметров шероховатости пар трения. Существенную роль в процессе формирования шероховатости поверхности играет роль нагрузка P_{on} , которая на необработанном масле имеет величину 5,3 МПа, а обработанном – 6 МПа.

Выводы по четвертой главе

1. В результате исследований зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры были получены линейные математические выражения зависимости коэффициента поверхностного натяжения минерального, полусинтетического и синтетического моторного масла от температуры.

2. Эксперимент по определению зависимости температуры масла от времени обработки ультразвуком при частоте 17 кГц и 43 кГц и мощности 25...50 Вт показал, что повышение температуры масла начинается после 120 с, а после 600 с обработки достигает $\Delta T = 10...11^{\circ}\text{C}$, причем ΔT слабо зависит от частоты и мощности ультразвука для минерального, полусинтетического и синтетического моторного масла.

3. Эксперимент по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения масла (σ) от времени обработки его ультразвуком ($F = 43$ кГц, $P = 50$ Вт) показал:

- для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40 при времени обработки от 0 до 120 с σ практически не отличается от исходного, после 120 с σ начинает понижаться, причем понижение обусловлено нагреванием масла и подчиняется зависимости 4.1.1 (см. раздел. 4.1);

- для полусинтетического «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 и синтетического «ZIC X7 Diesel» 10W-40 масел существенное снижение σ ,

обусловленное кавитацией, наблюдается в диапазоне 20...60 с, при этом дальнейшее понижение σ начинается после 120 с, связано с нагреванием масла и подчиняется зависимостям 4.1.2 и 4.1.3 (см. раздел. 4.1).

4. Эксперимент по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения масла (σ) от частоты и мощности ультразвука при времени обработки 90 с показал:

- для минерального масла «Lukoil DIESELOIL» 10W-40, независимо от значений частоты и мощности сигнала, отклонение σ от исходного, измеренного для масла, необработанного ультразвуком, не превышает $\pm 0,16\%$;

- для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 при мощности сигнала 10 Вт отклонение σ от исходного не превышает 0,03%, независимо от частоты;

- для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 при мощности сигнала от 25 Вт до 50 Вт отклонение σ от исходного незначительно до частоты сигнала 12 кГц, а при превышении частоты сигнала 12 кГц σ начинает ощутимо снижаться и при частоте сигнала 17 кГц достигает минимального значения, которое на 3,81% меньше исходного, причем при обработке масла ультразвуком с частотой 43 кГц значение σ практически равно значению при частоте сигнала 17 кГц, причем это наблюдается и при мощности сигнала 30 Вт и при 50 Вт;

- для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 при мощности сигнала 10 Вт отклонение σ от исходного не превышает 0,06%, независимо от частоты;

- для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 при мощности сигнала от 25 Вт до 50 Вт отклонение коэффициента σ от исходного незначительно до частоты сигнала 12 кГц, а при превышении частоты сигнала 12 кГц σ начинает ощутимо снижаться и при частоте сигнала 17 кГц достигает минимального значения, которое на 4,89% меньше исходного, причем при обработке масла ультразвуком с частотой 43 кГц значение σ

практически равно значению при частоте сигнала 17 кГц, причем это наблюдается и при мощности сигнала 30 Вт и при 50 Вт.

5. Согласно качественной модели (раздел 2.2 данной работы, вариант, изображенный на рисунке 2.8 б), коэффициент поверхностного натяжения должен существенно изменяться в зависимости от частоты для синтетического масла, обладающего более высокой вязкостью, чем для минерального, имеющего более высокую плотность. Экспериментальные исследования для двух масел, имеющих крайние значения плотности и вязкости, подтвердили высказанные предположения. На рис. 4.5 (раздел 4.2.) хорошо видно незначительное (0,3%) изменение коэффициента поверхностного натяжения минерального масла «Lukoil DIESELOIL» SAE 10W-40 при изменении частоты колебаний в диапазоне 0...43 кГц. В тоже время отклонение коэффициента поверхностного натяжения для синтетического масла "ZIC X7 Diesel" 10W-40 составило почти 5%.

Увеличение мощности источника ультразвука с 30 Вт до 50 Вт не оказало существенного влияния на изменение коэффициента поверхностного натяжения масел (см. раздел 4.2): для масла «Lukoil DIESELOIL» SAE 10W-40 снижение составило 0,11% (табл. Б.8), а для масла "ZIC X7 Diesel" 10W-40 – 0,06% (табл. Б.10). Вероятно, отсутствие влияния мощности на изменение коэффициента поверхностного натяжения связано с достижением предела его изменений. Таким образом, некоторые положения предложенной качественной модели влияния плотности и вязкости жидкости на разрыв ее сплошности при акустической кавитации были экспериментально подтверждены

6. Эксперимент по определению времени сохранения эффекта снижения коэффициента поверхностного натяжения, полученного вследствие ультразвуковой кавитации при обработке масла ультразвуком показал:

– для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 эффект сохраняется в течение 56 часов;

– для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 эффект сохраняется в течение 72 часов.

Таким образом, можно заключить, что для синтетического масла, эффект сохраняется на 16 часов дольше, чем для полусинтетического.

7. Эксперимент по оценке эффективности оригинального кавитационного способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки показал, что выведенная расчетно-экспериментальным методом зависимость концентрации металла в суспензии от времени обработки даже при небольшой мощности кавитационного излучателя (30 Вт) обеспечивает интенсивное внесение в масло мелкодисперсионных частиц, что позволяет упростить процесс внесения в масла и смазки, мелкодисперсных металлических и неметаллических материалов с целью изменения физико-механических и химических свойств смазки.

8. Эксперимент по определению зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке показывает, что при ультразвуковой обработке минерального масла (частота УЗ 12 кГц и 17 кГц, Т 23⁰ и 40⁰), вязкость изменялась не более, чем на 0,3%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 12 кГц, Т 23⁰), вязкость уменьшилась на 2,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 12 кГц, Т 40⁰), вязкость уменьшилась на 1,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота УЗ 17 кГц, Т 23⁰), вязкость уменьшилась на 8,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (частота 17 кГц Т 40⁰), вязкость уменьшилась на 7,6%.

9. Испытания образцов пар трения ("ролик"- "колодка") на прирабатываемость на машине трения 2070 СМТ- 1М показали:

– при обработке масла ультразвуком частотой 8 кГц предзадирая нагрузка коэффициент трения, а также соответствующая ему оптимальная нагрузка не изменились по сравнению с испытаниями с использованием масла, необработанного ультразвуком;

- при обработке масла ультразвуком частотой 12 кГц предзадирная нагрузка увеличилась на 6,5%, а коэффициент трения уменьшился на 3,6%, при этом соответствующая ему оптимальная нагрузка не изменилась по сравнению с испытаниями с использованием масла, не обработанного ультразвуком.

- при обработке масла ультразвуком частотой 17 кГц предзадирная нагрузка увеличилась на 22,2%, коэффициент трения $f_{\min}$ уменьшился на 13,1%, а соответствующая ему оптимальная нагрузка увеличилась на 12,5% по сравнению с испытаниями с использованием масла, не обработанного ультразвуком.

10. Длительные износные испытания образцов пар трения ("ролик"- "колодка") на машине трения 2070 СМТ-1М показали:

- показатель фактора износа при обработке смазки ультразвуком с частотой 17 кГц уменьшился на 28% по сравнению с необработанной ультразвуком смазкой, что позволило скорректировать формулу определения фактора износа пар трения при УЗ обработке синтетической смазки и доказать, что зависимость показателя фактора износа от частоты ультразвука при обработке синтетической смазки ультразвуком с частотами в диапазоне от 0 до 44 кГц по форме повторяет аналогичную зависимость для коэффициента поверхностного натяжения смазки.

Результаты исследований, приведенные в главе 4, опубликованы автором в работах [117, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 167]

5. Проверка предложенных решений и оценка их экономической эффективности

5.1. Стенд для ускоренных износных испытаний компрессоров

Для достоверной и простой оценки тенденций изменения характеристик основных агрегатов ДВС автотракторной техники, наряду с промышленной эксплуатацией при постоянном контроле ключевых параметров [6, 112], при проведении мероприятий по активации смазочных моторных масел применяются методы физического моделирования работы полноразмерных агрегатов. В качестве узла, моделирующего работу цилиндропоршневой группы (ЦПГ) автотракторного ДВС, обычно выступает поршневой компрессор [3].

Проводятся ускоренные эксплуатационные испытания компрессоров на специальном стенде. Определяются и сравниваются показатели износа трущихся деталей ЦПГ компрессоров без и при ультразвуковой обработке моторных масел. Полученные результаты позволяют провести достоверную оценку влияния ультразвуковой обработки масел на износные и ресурсные показатели агрегатов ДВС.

Одноцилиндровый поршневой компрессор А 29.01.000 является важным агрегатом тракторного дизельного двигателя. Компрессором укомплектованы тракторы МТЗ 80, 82 и МТЗ 100, 102 с дизельными двигателями ММЗ Д-240, Д-245. Привод компрессора осуществляется от шестерни топливного насоса высокого давления при передаче вращения через промежуточную шестерню на ведомую шестерню, установленную на коленвале компрессора. Охлаждение компрессора воздушное. Смазка трущихся поверхностей осуществляется разбрызгиванием масла, поступающего из масляной магистрали двигателя.

Компрессор входит в пневматическую систему привода тормозов, которая включается только при работе трактора с прицепами и другими

механизмами, снабженными пневматическим приводом тормозов, а также при накачке шин колес трактора. При работе трактора в других режимах работы компрессор может быть выключен при помощи рычага включения, поворот которого в горизонтальное левое положение выводит промежуточную шестерню компрессора из сцепления с шестерней топливного насоса двигателя.

Таким образом, при общей работе тракторного двигателя в течение 960 мото-часов (время работы дизеля, по истечении которого рекомендуется профилактика его агрегатов, включая компрессор) [138], компрессор работает, в среднем, не более 250 часов.

Для подтверждения количественных параметров изменения показателей износа цилиндропоршневой группы компрессоров А29.01.000 при ультразвуковой обработке моторного масла, смазывающего компрессор, проводятся ускоренные износные испытания компрессоров. Принцип ускоренных износных испытаний – одновременное функционирование двух компрессоров, от общего привода (электромотора). Компрессоры имеют автономные масляные картеры. Смазка трущихся деталей компрессора производится разбрызгиванием масла, поступающего в картеры компрессоров из общего заливного бачка. В картере одного из компрессоров производится периодическое автоматизированное ультразвуковое облучение масла. Источником ультразвука является дисковый пьезоизлучатель, прикрепленный снаружи к днищу масляного картера компрессора. Форсированный режим работы компрессоров на стенде обеспечивается тем, что оба компрессора (в отличие от работы в пневмосистеме реального трактора) постоянно подключены к шестерням приводного вала. После функционирования компрессоров в течение времени, определенного методикой испытаний, производится оценка суммарного износа интегральным методом [108], то есть измеряется весовой износ деталей цилиндропоршневой группы (компрессионных и маслосъемных поршневых колец) обоих компрессоров и сравнивается.

Для проведения ускоренных эксплуатационных испытаний компрессоров автором разработан и изготовлен специальный стенд. Схема стенда представлена на рис. 5.1, а общий вид стенда - на рис.5.2. Нумерация узлов на рисунках 5.1 и 5.2 идентична.

При функционировании стенда вал электромотора, через редуктор, приводит в движение общий приводной вал компрессоров. Шестерни, запрессованные на валу, через промежуточные шестерни компрессоров, передают крутящий момент на шестерни коленвалов обоих компрессоров. Вращение коленвала приводит в движение шатун и обеспечивает возвратно-поступательное движение поршня. При движении поршня вниз воздух, через всасывающий клапан, поступает в цилиндр. При движении поршня вверх всасывающий клапан закрывается, а сжатый воздух, через нагнетательный клапан, поступает в узел сброса.

При достижении давления воздуха в узле $7,3 \text{ кг/см}^2$ срабатывает предохранительный клапан, избыточный воздух сбрасывается и давление понижается. Узел сброса снабжен также вентилем ручного сброса воздуха.

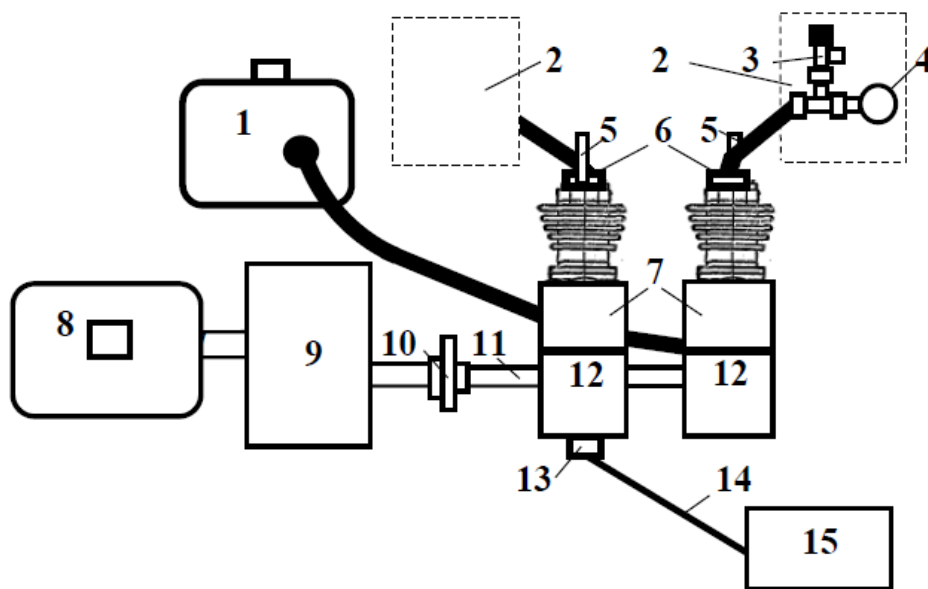


Рисунок 5.1 - Схема стенда для ускоренных эксплуатационных испытаний компрессоров :1 - заливной бачок системы смазки; 2 - узел сброса избыточного давления воздуха;3 - предохранительный клапан; 4 - манометр; 5 - всасывающий клапан компрессоров; 6 - нагнетательный клапан компрессоров;7 - компрессоры; 8 - электромотор; 9 - редуктор; 10 -фланцевое соединение; 11 - общий приводной вал компрессоров; 12 - картеры компрессоров; 13 - пьезоизлучатель; 14 - кабель; 15- ультразвуковой генератор.

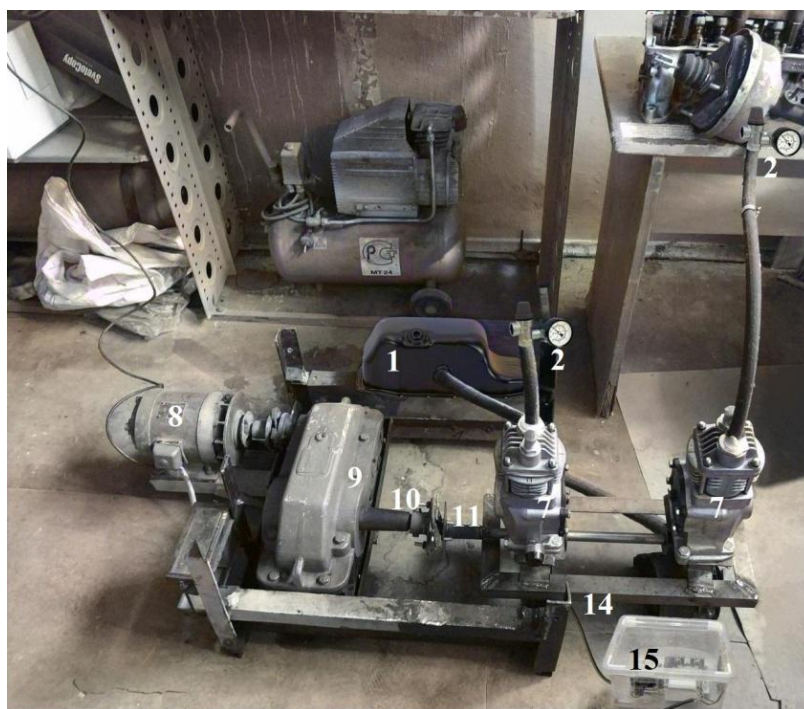


Рисунок 5.2 - общий вид стенда для ускоренных испытаний компрессоров

Основным узлом, управляющим ультразвуковой обработкой масла в картере компрессора, является ультразвуковой генератор (УЗГ). Общий вид УЗГ представлен на рис 5.3

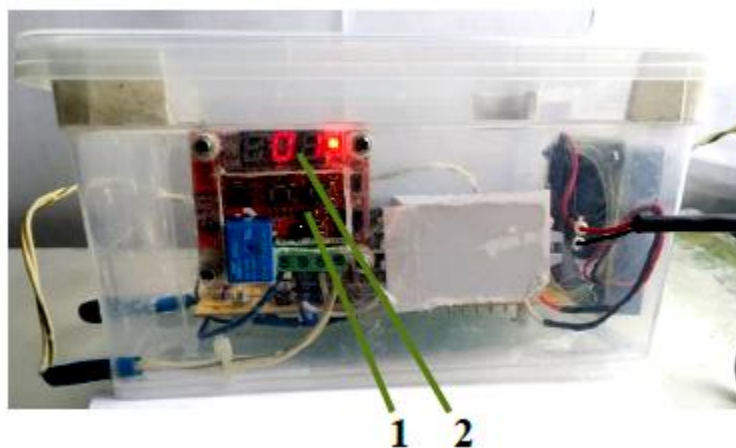


Рисунок 5.3- Вид УЗГ: 1 - окно для настроек таймера с кнопками; 2 - цифровой индикатор.

УЗГ предназначен для генерации ультразвуковых колебаний с частотой 43 кГц. и мощностью 50 Вт. Особенностью УЗГ является возможность установки длительности времени работы ультразвукового излучателя и интервала между его включениями в диапазоне от 1 с до 999 ч.

Функциональная схема УЗГ представлена на рис. 5.4.

Внешний вид платы управления представлен на рис. 5.5.

Электропитание платы осуществляется от адаптера 12В 1,5 А. Провода питания присоединены к клеммам 6 (+12 В) и 7 (-12 В) платы. Напряжение ≈ 220 В(фаза) от шнура питания блока поступает на клемму 4 платы и, далее, на прерыватель (релеSDR-12VDC), управляемый программируемым таймером, с выхода прерывателя напряжение поступает на клемму 5 платы, откуда подаются на входы питания ≈ 220 В (фаза) платы генерации и блока питания кулера.

В режиме настроек на цифровом индикаторе 1 индицируются значения параметров таймера; в режиме работы УЗГ на цифровом индикаторе 1 индицируется обратный отсчет текущего интервала времени работы УЗГ или времени ожидания следующего включения. При работе УЗГ горит красный светодиод 8, в режиме ожидания диод 8 гаснет.

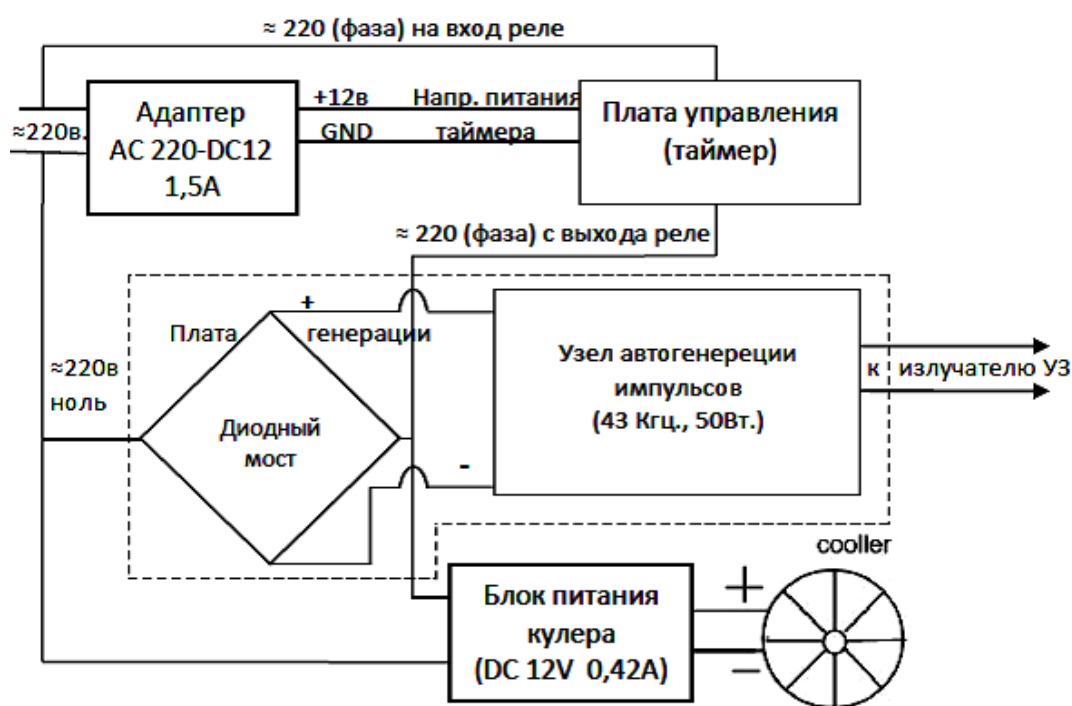


Рисунок 5.4. Функциональная схема УЗГ

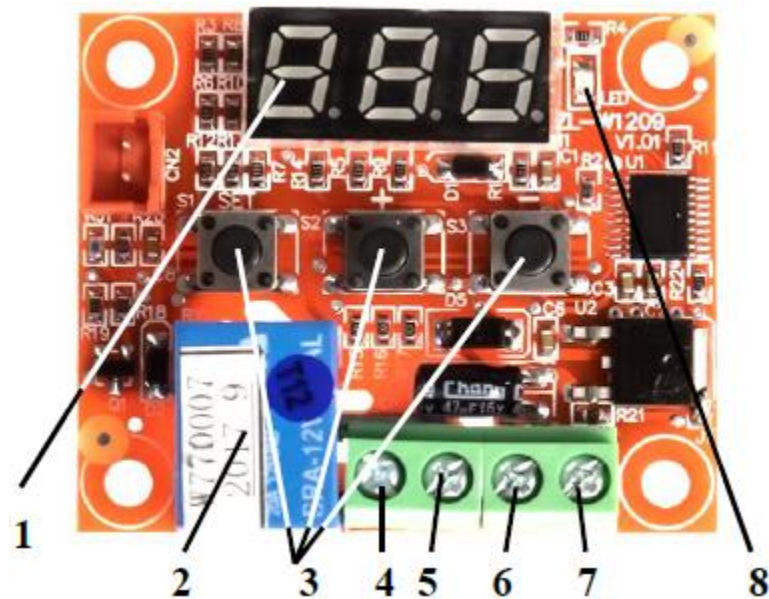


Рисунок 5.5 - Программируемый таймер: 1 - цифровой индикатор; 2 - релеSDR-12VDC; 3 - кнопки установки параметров; 4,5,6,7 - клеммы для коммутации проводов; 8 - светодиод

Плата генерации УЗГ содержит: выпрямительный диодный мост и узел автогенерации электромагнитных импульсов. В режиме работы УЗГ электромагнитные импульсы с частотой 43кГц. и мощностью 50 Вт подаются на двухконтактный разъем JST - ХН платы, откуда через экранированную витую пару поступают на пьезоэлектрический дисковый излучатель ультразвуковых колебаний(на рисунках 5.4 и 5.5 не представлен). Излучатель с помощью специального клея крепится снаружи к поддону с облучаемой смазкой. При креплении предусмотрена токоизолирующая прокладка.

Настройки параметров управляющего таймера осуществляются при помощи трех кнопок (3) платы управления. Для входа в меню настроек необходимо нажать и удерживать несколько секунд крайнюю левую кнопку, когда на индикаторе (1) появятся параметры меню (U1-U4), кнопку можно отпустить. Последовательным нажатием на среднюю кнопку выбирается один из четырех параметров (U1, U2, U3, U4), далее, чтобы внести изменение в выбранный параметр нужно нажать крайнюю левую кнопку. После этого на цифровом индикаторе вы увидите текущее значение выбранного параметра, для изменения значения необходимо последовательно нажимать на среднюю

(+) или правую (-) кнопку. Чтобы подтвердить выбранное значение - нажать крайнюю левую кнопку. Тогда выбранное значение сохранится, и вы возвратитесь обратно в меню выбора параметров. Таким образом настроив все параметры, для возврата в режим отображения текущего времени таймера - просто не надо нажимать ничего в течении нескольких секунд.

Значения параметров настройки: U1 - единица измерения рабочего времени для таймера - (0 - секунды, 1 - минуты, 2- часы); U2 - (от 0 до 999) длительность включения, например, при U1 - 0, а U2 - 10 - это будет означать 10 секунд, а при U1 - 1 - это уже будет 10 минут; U3 - единица измерения времени ожидания для таймера - (0 - секунды, 1 - минуты, 2- часы); U4 - (от 0 до 999) длительность ожидания таймера перед началом работы U4 работает по такому же принципу, как и U2, только с единицами измерения выбранными в U3.

При выключении УЗГ из сети параметры настройки времени работы и паузы между включениями сохраняются.

При разработке методики испытаний компрессоров на стенде для ускоренных износных испытаний использованы положения руководящих документов: Межгосударственный стандарт ГОСТ 23.205-79 "Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима"; Межгосударственный стандарт ГОСТ 7057-2001 "Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний"; Стандарт РФ ГОСТ Р 54783-2011 "Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения" и Руководство РД 50-424-83 "Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения".

Для подтверждения повышения износостойкости узлов цилиндропоршневой группы компрессоров А29.01.000 для дизельных двигателей ММЗ Д-240, Д-245 при ультразвуковой обработке дизельного моторного масла, проводятся эксплуатационные испытания компрессоров на стенде для ускоренных ресурсных испытаний. Общее время работы

компрессоров в составе стенда, необходимое для проведения испытаний - 256 часов. При организации работы стенда в течение 8 часов при перерыве 16 часов, для проведения испытания потребуется 45 суток. Режим проведения испытаний с перерывами выбран для дополнительного форсирования режима работы компрессоров, так как наибольший износ деталей цилиндропоршневой группы происходит при пуске и остановке [58]. Испытания проводятся в помещении, оснащенном приспособлениями, инструментом и материалами для разборки, промывки и просушки деталей ДВС и, в частности, компрессоров

Техническое обеспечение испытаний: - стенд для ускоренных ресурсных испытаний компрессоров; электронные часы; - аналитические весы фирмы «Sartorius» (Германия) с точностью измерения 0,00001 г.

Стенд размещается в хорошо освещенном помещении с возможностью подключения электромотора и УЗГ в отдельные заземленные розетки сети (≈ 220 В). Должен быть обеспечен свободный доступ ко всем узлам стенда.

До начала испытаний на стенде оба компрессора должны быть разобраны (сняты, промыты и высушены компрессионные и маслосъемные кольца поршней). После чего каждое кольцо взвешивается на аналитических весах фирмы «Sartorius» (Германия) 3 раза. Значения массы колец записываются в таблицу. Компрессоры вновь собираются и устанавливаются на стенд. Общий вид поршневых колец представлен на рис.3.17 а. Маслосъемное кольцо представлено на рис. 3.17 б

Перед началом испытаний необходимо проверить: наличие и уровень свежего моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 в заливном бачке стенда; надежность крепления и герметичность шлангов маслопровода и арматуры узла сброса воздуха; отсутствие сжатого воздуха в узле; надежность и целостность проводов и вилок для подключения к сети электромотора и УЗГ.

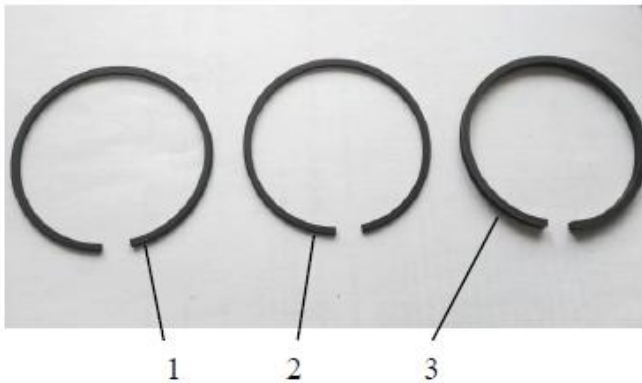


Рисунок 3.17 а - Поршневые кольца : 1-верхнее компрессионное кольцо; 2 - нижнее компрессионное кольцо; 3 - маслосъемное кольцо



Рисунок 3.17 б - Маслосъемное кольцо

Перед проведением испытаний необходимо осуществить настройки управляющего таймера УЗГ на следующие параметры: - время работы излучателя 10 мин; - время паузы между включениями 190 мин. Таким образом, за 8 часов непрерывной работы стенда будет произведено 2 автоматических включения излучателя ультразвука на 10 мин.

Ежедневное включение стенда проводится в следующем порядке: - проверка наличия и уровня масла в заливном бачке; - проверка отсутствия сжатого воздуха в узле сброса; - проверка подключения промежуточных шестерней обоих компрессоров к шестерням приводного вала (оба рычага включения в правом горизонтальном положении); - включение электромотора; - включение УЗГ.

Выключение стенда после 8 часов работы проводится в следующем порядке: - выключение электромотора; - выключение УЗГ; - спуск воздуха из узла сброса через выходной вентиль.

После 256-часового функционирования, компрессоры снимаются со стенда и разбираются. Поршневые кольца снимаются, промываются, сушатся и взвешиваются на аналитических весах фирмы «Sartorius» (Германия) 3 раза. Значения массы колец записываются в таблицу. Для каждого кольца вычисляются среднеарифметическое значение веса, среднее квадратическое отклонение результатов взвешивания (σ), и коэффициент

вариации (V). Вычисленные значения также записываются в таблицу. Сравнивается вес каждого кольца до и после испытаний, определяется весовой износ (Δ).

5.2. Результаты ускоренных износных испытаний компрессоров

Результаты испытаний компрессоров приведены ПРИЛОЖЕНИИ Б (табл. Б. 13 и Б. 14).

Обобщенная диаграмма интегрального весового износа деталей компрессоров представлена на рис.5.8.

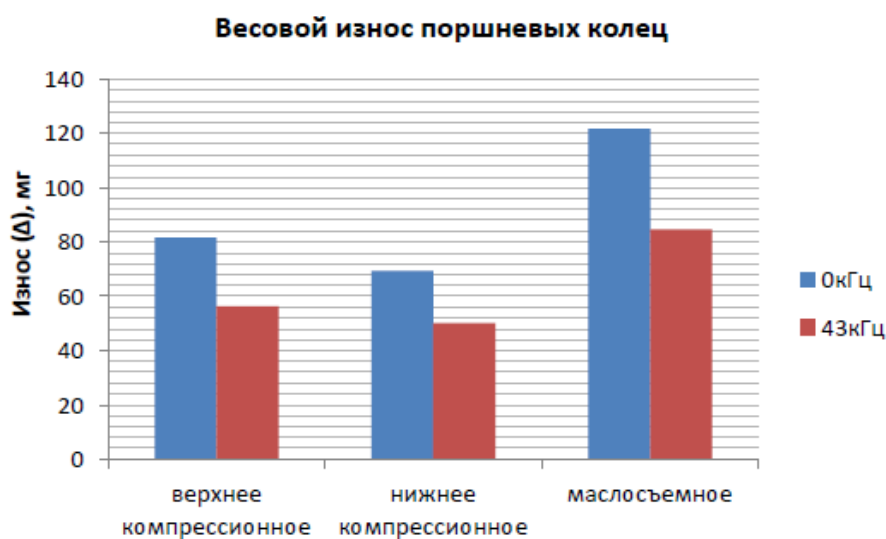


Рисунок 5.8 - Диаграмма весового износа деталей компрессоров: 0кГц - износ деталей без обработки масла ультразвуком; 43кГц - износ деталей при обработке масла ультразвуком с частотой 43 кГц

Анализ результатов взвешивания компрессионных и маслосъемных колец компрессоров показал:

- среднее квадратическое отклонение результатов взвешивания каждого из колец обоих компрессоров не превышает 0,0065 г;
- коэффициент квадратичной вариации не превышает 0,1 %;
- при обработке моторного масла ультразвуком с частотой 43 кГц. и мощностью 50Вт весовой износ верхнего компрессионного кольца снизился на 31%, нижнего компрессионного кольца - на 28%, а маслосъемного кольца - на 30%.

Результаты износных испытаний компрессоров на стенде для ускоренных испытаний рассматриваются в качестве результатов

физического моделирования и дают достоверную количественную оценку снижения износа и увеличения ресурса безремонтной работы компрессоров при ультразвуковой обработке моторного масла - 29,7 %, а также позволяют провести предварительную оценку экономической эффективности применения устройства для снижения износа агрегатов ДВС путем периодической ультразвуковой обработки смазочных масел.

5.3. Оценка экономической эффективности применения устройства периодической ультразвуковой обработки смазочных масел

Для расчета годового экономического эффекта от повышения ресурса компрессора А29.01.000 при периодической обработке смазочного масла ультразвуком применяется формула [11], упрощенная с учетом равных себестоимостей ремонта компрессоров независимо от внедрения устройства УЗ обработки масла:

$$\mathcal{E}_e = C \times \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2} \right) \times W_{\Gamma}, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_e$ - годовая экономия, руб.; C - себестоимость ремонта компрессора, руб.; W_1 , - ресурс компрессора до ремонта (без внедрения устройства), час; W_2 - ресурс компрессора до ремонта (с внедрённым устройством), час; W_{Γ} - плановая наработка, час.

Согласно "Межотраслевых укрупненных норм времени на ремонт тракторов (гусеничных, колесных)" утвержденных Постановлением Минтруда РФ № 32 от 15.06.1995г., норма времени на капитальный ремонт ДВС типа Д - 240 составляет: 3,74 чел/час.

Средняя месячная заработная плата автослесаря по ремонту дизельных двигателей грузовых автомобилей и тракторов (по Рязанской обл.) в 2020 г. равна 38294 руб. Среднемесячное количество рабочих часов в 2020 году – 164,92 часа. Тогда почасовая ставка авторемонтника равна 232,4 руб.

Себестоимость ремонта компрессора приведена в табл. Б.17
ПРИЛОЖЕНИЯ Б.

Предполагаемая стоимость внедрения устройства периодической УЗ обработки масла в компрессор приведена в табл.Б.18 ПРИЛОЖЕНИЯ Б.

С учетом данных таблиц Б17 и Б 18 расчетный годовой экономический эффект: $\mathcal{E}_z = 1096,5$ руб./год.

Стоимость внедрения устройства периодической УЗ обработки моторного масла: $C_{вн} = 6240$ руб.

Срок предполагаемой окупаемости внедрения устройства:

$$T_{ок} = C_{вн} / \mathcal{E}_z = 6240 / 1096,5 = 5,6 \text{ лет.}$$

Выводы по пятой главе

1. В период с 02 сентября 2020г по 28 октября 2020г. в лаборатории кафедры ТЭТ РГАТУ были проведены ускоренные износные испытания компрессоров А29.01.000 на стенде для ускоренных испытаний. Результаты испытаний подтверждены актом (см. ПРИЛОЖЕНИЕ Г). Испытания показали, что при периодической ультразвуковой обработке моторного масла, интегральный износ верхнего компрессионного, нижнего компрессионного и маслосъемного поршневых колец уменьшился на 31%, 28% и 30% соответственно.

2. Результаты ускоренных эксплуатационных испытаний поршневых компрессоров, позволяют сделать достоверную количественную оценку повышения ресурса компрессора при обработке моторного масла ультразвуком. Ресурс повысился, в среднем, на 29,7 %.

3. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения устройства для периодической ультразвуковой обработки в смазочную систему компрессора составляет 1096,5 руб. При стоимости внедрения устройства - 6240 руб. срок окупаемости составит 5,68 лет.

4. Результаты исследований, приведенные в главе 5, опубликованы автором в работах [125, 130].

Заключение

Результаты диссертационной работы

В процессе проведенных исследований и подготовки диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Получены зависимости, описывающие влияние параметров ультразвука и времени обработки на физико-механические характеристики моторного масла, а также остаточные эффекты в нем, при этом установлено, что:

- максимальное снижение (4,89%) коэффициента поверхностного натяжения σ для синтетического моторного масла при обработке ультразвуком в течение 90 с наблюдается при частоте ультразвука от 17 кГц до 43 кГц и мощности сигнала от 25 Вт до 50 Вт;

- при обработке полусинтетического и синтетического моторного масла ультразвуком с частотой 17 кГц при мощности сигнала 25Вт существенное снижение σ , обусловленное акустической кавитацией, наблюдается при времени обработки от 20 с до 60 с, при этом дальнейшее снижение σ начинается после 120 с обработки, что связано с нагреванием масла от излучателя и подчиняется аналитическим зависимостям поверхностного натяжения масла от его температуры;

- эффект сохранения результатов обработки масла ультразвуком (снижение σ), для полусинтетического масла наблюдается в течение 56 ч, для синтетического масла – в течение 72 ч;

- максимальное снижение кинематической вязкости синтетического масла наблюдалось при мощности сигнала 25 Вт, частоте 17кГц и температуре масла 23⁰С, и составило 8,2%, а для минерального масла снижение при любой частоте и мощности сигнала составило не более 0,3%;

- способ получения и внесения в масло мелкодисперсных добавок, путем кавитационного износа помещенных в масло материалов и

диспергирования полученных мелкодисперсных частиц (патент РФ № 2690193) дает значительный эффект даже при малой мощности источника ультразвука ($P=30\text{Вт}$).

2. Полученные аналитические зависимости коэффициента поверхностного натяжения синтетического масла от частоты ультразвука при его ультразвуковой обработке позволили предположить, что изменение показателя фактора износа для синтетического масла будет повторять зависимость коэффициента поверхностного натяжения от частоты ультразвука.

3. При длительных износных испытаниях образцов пар трения (ролик-колодка) на машине трения 2070 СМТ-1М установлено, что максимальное уменьшение фактора износа при обработке синтетического масла ультразвуком с частотой 17кГц и мощностью 25Вт составило 28%, что позволило скорректировать формулу определения показателя фактора износа пар трения при УЗ обработке масел.

4. Разработана конструктивно-технологическая схема устройства для периодической ультразвуковой обработки моторного масла в системе смазки компрессора А29.01.000 двигателя Д-240. Проведенные ускоренные износные испытания показали, что при периодической ультразвуковой обработке моторного масла интегральный весовой износ верхнего компрессионного, нижнего компрессионного и маслосъемного поршневых колец уменьшился на 31%, 28% и 30%, соответственно Расчетный годовой экономический эффект от внедрения устройства для периодической УЗ обработки масла составил 1096,5 руб.

Предложения производству

Предлагаемый метод снижения износа позволяет интегрировать устройство ультразвуковой обработки в систему смазки дизеля, например, в его картер. При этом периодическая обработка смазочного масла позволит несущественно нагружать генератор и аккумулятор дизеля.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Необходимо продолжить работы по оптимизации конструктивных параметров устройства периодической ультразвуковой обработки моторного масла, обеспечивающих интеграцию в систему смазки различных дизельных двигателей. Для снижения износа и повышения ресурса агрегатов дизельных ДВС мобильной техники, используемой в АПК, рекомендуется установка на них адаптированного устройства для периодической ультразвуковой обработки моторного масла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонькин, Ф.Н. Текущий ремонт автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. - М: Транспорт, 1978. - 269 с.
2. Акулин, В.В. Повышение долговечности мобильной сельскохозяйственной и автотранспортной техники триботехнологиями приработки основных сопряжений деталей двигателей [Текст] / В.В. Акулин, Т.Н. Замота, С.В. Лысенко //Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2017. № 8. - С. 55-68.
3. Аметов, В.А. Повышение эксплуатационной надежности агрегатов автотранспортных средств путем контроля и модифицирования смазочных масел: дисс. ... докт. техн. наук: 05.22.10 [Текст] / Аметов Винур Абдурафиевич.- Тюмень, 2006. – 382с
4. Арчбютт, Л.Л. Трение, смазка и смазочные материалы. Руководство по теории и практике смазки и по методам испытания смазочных материалов [Текст] / Л.Л. Арчбютт, Р.М. Дилей. -М: Госгоргеолнефтиздат, 1934. - 703 с.
5. Адгамов, И.Ф. Комплексная оценка эксплуатационных свойств моторных масел [Текст] / И.Ф. Адгамов, Д.А. Уханов, К.В. Шаталов // Теория и практика производства и применения современных горюче-смазочных материалов: сб. материалов Международной НТК. - Москва: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019 - С.66-67.
6. Арженовский, А.Г. Методика и средства определения энергетических и топливно-экономических показателей тракторов в эксплуатационных условиях: монография [Текст] / А.Г. Арженовский, Д.В. Казаков. - Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2018 - 171с.
7. Балякин, В.Б. Исследование влияния типа консистентной смазки на коэффициент трения и степень изнашивания контактной пары коррозионностойкая сталь – фторопласт [Текст] / В.Б. Балякин, И.А. Ганин, А.В. Лаврин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, №1. - С. 72-76..
8. Бардаханов, С.П. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении [Текст]

/С.П.Бардаханов, А.И.Корчагин // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409, №3.- С.320-323.

9. Баринов, С.В. Исследование износостойкости деталей с неоднородной поверхностью трения [Текст] / С.В. Баринов, Б.П.Загородских, А.А. Симдянкин// Трение и износ. 2003. Т. 24. №5. -С. 568-572.

10. Баринов, С.В. Повышение износостойкости деталей их слоением [Текст] / С.В. Баринов, Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин// Трение и износ. 2001. Т. 22. №6 -С. 703-706.

11. Баринов, С.В. Повышение износостойкости цилиндропоршневой группы автотракторных двигателей путем биметаллизации внутренней поверхности гильзы цилиндров: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03[Текст] /Баринов Сергей Вячеславович.- Саратов, 2003. – 131 с.

12. Бергман, Л., Ультразвук [Текст] /Л. Бергман.-Москва: Изд-во Иностранной литературы, 1957. – 726 с.

13. Березин К.Г. Построение безразмерного критерия для оценки антизадирных свойств поверхностно активных смазочных материалов [Текст]/ К.Г. Березин, В. А. Годлевский, Б.Р. Киселев, А.О. Магницкий // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 4. – С. 67-51

14. Бугаев В.Н. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей [Текст] / В.Н. Бугаев. – Москва: Колос, 1981. – 208 с.

15. Виноградов, Г.В. Механизм противоизносного и антифрикционного действия смазочных сред при тяжелых режимах граничной смазки [Текст]/ Г.В. Виноградов, Ю.Я. Полонский // О природе трения твердых тел: сборник научных трудов. - Минск: Наука и техника, 1971. С. 281-304.

16. Волков, В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы[Текст] / В.А. Волков. - Москва: Лань, 2015. - 672с.

17. Гайдар, С.М. Исследование свойств однокомпонентной смазывающе-охлаждающей жидкости [Текст] / С.М. Гайдар, А.В. Пыдрин // Сборник: Трибология - машиностроению. Труды XIII Международной научно-технической конференции. 2020. С. 81-84.

18. Гайдар С.М. Молекулярная инженерия в трибологии [Текст] / С.М. Гайдар, А.Б. Лагузин // Сборник: Трибология - машиностроению. Труды XII

Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. 2018. С. 128-132.

19. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник - 4-е изд, перераб. и дополн. [Текст] / Д.Н. Гаркунов. - М: Машиностроение, 2001. - 614 с.

20. Гельман, Б.М. Сельскохозяйственные тракторы и автомобили. Кн. 1. Двигатели [Текст] /Б.М. Гельман, М.В. Московин. – М: Агропромиздат, 1987. – 287 с.

21. Гительман, Д.А. Повышение послеремонтной долговечности автотракторных двигателей применением трибопрепаратов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 [Текст] /Гительман Денис Александрович- Москва, 2016. – 135 с.

22. Григорьев, М.А. Износ и долговечность автотракторных двигателей [Текст] /М.А.Григорьев, Н.Н. Пономарев. – Москва: Машиностроение, 1976. – 248 с.

23. Гуревич, А.М. Конструкция тракторов и автомобилей[Текст] / А.М. Гуревич, А.К. Болтов, В.И. Судницын – М: Агропромиздат, 1989. – 368 с.

24. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, П.Э.Сыркин, В.И. Чумак. - М: Транспорт, 1994. - 144с.

25. Гурьев М. А. Повышение износостойкости деталей машин и инструмента поверхностным легированием при производстве литых изделий: дисс. ... канд. техн. наук 05.16.09 [Текст] / Гурьев Михаил Алексеевич. - Барнаул, 2010– 191с.

26. Дидманидзе О.Н. Способы повышения мощности двигателей тракторов [Текст] / Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н., Гузалов А.С.// В сборнике Чтения академика В.Н. Болтинского. Семинар: сборник статей. 2020. С. 233-239.

27. Денисов, А.С. Влияние условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя [Текст] / А.С. Денисов, И.К. Данилов // Вестник СГТУ. - 2005. - № 1 (6). - С. 74-80.

28. Дмитриева, Л.А. Влияние присадок на трибологические свойства моторных масел./Л.А.Дмитриева // Автотракторостроение – 2009: Материалы научного симпозиума, Секция 2 –Москва: Изд-во МГТУ МАМИ, 2009 - С.63-65.
29. Дорогочинская, В.А. Присадки к топливам и смазочным материалам. Учебное пособие[Текст] / В.А. Дорогочинская, А.М. Данилов, Б.П. Тонконогов - М: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017. - 290 с.
30. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (Трение, износ, смазка) [Текст] / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов -М: Эко-пресс, 2010.- 604с.
31. Дьяков, И.Ф. Проектирование автотракторных двигателей: Учебное пособие [Текст] / И.Ф. Дьяков, Р. А. Зейнетдинов – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 168 с.
32. Ерохин, М.Н Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие [Текст] / М.Н. Ерохин, А.В. Карп, Е.И. Соболев и др. - М: Колосс, 2005. - 462 с.
33. Ждановский, Н.С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей[Текст] / Н.С. Ждановский, А.В. Николаенко. - Ленинград: Колос, 1981. - 295 с.
34. Жосан, А.А. Влияние гамма излучения на эксплуатационные свойства моторных масел на минеральной основе [Текст] / А.А.Жосан, М.М. Ревякин, С.И. Головин //Академия Наук Молдовы и институт прикладной физики, Кишинэу, Республика Молдова, Электронная обработка материалов. – 2018. - № 54(1). - С. 75-79.
35. Жосан, А.А. К вопросу об улучшении эксплуатационных свойств моторных масел [Текст] / А.А.Жосан, М.М. Ревякин, Д.С. Ершов //Агротехника и энергоснабжение – 2016. - № 2(11). - С. 81-86.
36. Журавлев, А. А. Исследование зависимости вязкости моторного масла от температуры [Электронный ресурс]/А.А. Журавлев, Н.П. Савин, Н.О. Филатова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 12. – С. 82–86. – URL: <http://e-koncept.ru/2016/46217.htm>.
37. Заславский, Ю.С. Трибология смазочных материалов [Текст] / Ю. С. Заславский - Москва: Химия, 1991. - 240 с.

38. Зенин, С.В. Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса [Текст] / С.В. Зенин // Докл. РАН, 1993. – Т.332. – №3. – С.328-329.

39. Зенин, С.В. Структурированное состояние воды как основа управления поведением и безопасностью живых систем: дис. ... докт. биологических наук 05.26.02 [Текст] / Зенин Станислав Валентинович - Москва, 1999. - 208 с.

40. Иншаков, А.П. Основы расчета и испытания автотракторных двигателей. Учебное пособие [Электронный ресурс] / А.П. Иншаков - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. - 212 с.

41. Кадыров, С.М. Долговечность автотракторных двигателей в условиях Средней Азии [Текст] / Кадыров С.М. - Ташкент: Укитувчи, 1982. - 272 с.

42. Калмыков, В.В. Исследование зависимости смазываемости конструкционных материалов от величины поверхностного натяжения масел [Текст] / В.В. Калмыков, Д.А. Мельников, М.С. Горбачева, А.А. Сухарева // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 6. – С. 47-51.

43. Каргин, Б.С. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на эффективность технологических смазок [Текст] / Б.С.Каргин, А.С.Анищенко, С.Б.Каргин, В.С.Хиора, Р.О.Ткачев, Н.А.Воронина // Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки - 2015. - Вип. 30.- Т.1. – С. 136-140.

44. Катков, Д.С. Повышение долговечности узлов трения мобильной сельскохозяйственной техники применением триботехнических методов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 [Текст] / Катков Данила Сергеевич. - Саратов, 2008 – 191 с.

45. Кикоин А.К. Общий курс физики. Молекулярная физика. Издание второе, переработанное [Текст] / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. - М:Наука, 1976. - 480 с.

46. Колосов, А.А. Способ и устройство для контроля и прогнозирования процесса обкатки двигателя внутреннего сгорания: дис.

...канд. техн. наук: 05.20.03 [Текст]/ Колосов Александр Анатольевич. – Рязань, 2004. – 130с.

47. Коныгин, С.Б. Классификация и геометрические характеристики дисперсных систем. Методическое руководство к практическим занятиям [Текст] /С.Б. Коныгин, С.В. Иваняков. - Самара: СГТУ, 2006-32 с.

48. Колокатов, А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин [Текст]/ А.М. Колокатов, А.Г. Гамидов // Москва. 2020. (2-е издание, исправленное и дополненное). -214 с.

49. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] /И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М: Машиностроение, 1977. – 526 с.

50. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: Справочник [Текст] / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М: Машиностроение, 1984. – 280 с.

51. Красильников, В.А. Введение в физическую акустику. [Текст] / В.А. Красильников, В.В. Крылов. - М: Наука, 1984. — 403 с.

52. Красильников, В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах[Текст] / В.А. Красильников. - М: Издательство Физико-математической литературы, 1960 г. – 560 с.

53. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник [Текст] / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М: Металлургия, 1991. – 752 с.

54. Кубич, В.И. Термодинамический аспект пленочного голодания в трибосопряжениях[Текст]/ В.И. Кубич, В.М. Юров// Проблемитертя та зношування. -2016. - №70. - С.58-66.

55. Кужаров, А.С. Трибологические проявления самоорганизации в системе латунь-глицерин-медь [Текст] / А.С. Кужаров, Р. Марчак, Я. Гузик, К. Кравчик, Е.Г. Задощенко // Трение и износ. 1996. – №1. – С.113-121.

56. Кухленко, А.А. Совершенствование методов расчета технологических параметров аппарата роторно-пульсационного типа для приготовления эмульсий: дис. ...канд. техн. наук: 05.17.08 [Текст] / Кухленко. Алексей Анатольевич. - Бийск, 2007. - 125 с.

57. Лебедев, А.Т. Совершенствование методов оперативного управления надежностью технических систем в АПК [Текст] / А.Т. Лебедев,

А.А. Серегин, А.Г. Арженовский // Тракторы и сельхозмашины. Выпуск №1 - Москва, 2020 - С. 71-76.

58. Лужнов, Ю.М. Основы триботехники: учебное пособие [Текст] / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. - М: МАДИ, 2013. - 136 с.

59. Лялякин, В.П. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники [Текст] / В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Техника и оборудование для села, 2016. - № 4. - С. 41-43.

60. Ляпидевский, В.Ю. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости: Монография [Текст] / Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 420 с.

61. Магомедбеков, Э.П. Влияние γ -излучения на физико-химические свойства масел ВМ-4 и ВМ-5[Электронный ресурс] / Э.П. Магомедбеков, А.Б. Сазонов, В.И. Ермаков // Электронный журнал "Исследовано в России."-2004 - №7-С.534-543. <http://zhurnal.ape.relarn.ru>.

62. Мамонова, М.В. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы [Текст] /М.В. Мамонова, В.В. Прудников, И.А. Прудникова. - М: ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 406 с.

63. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы, приложения [Текст] / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. - С П-б: Профессия, 2007. - 560 с.

64. Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства. Справочник: пер. с английского [Текст] / Т. Манг, У. Дрезель. - С П-б: Профессия, 2010. - 944 с.

65. Маргулис, М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): учебное пособие для хим. и хим.-технол. спец. Вузов [Текст] /М.А. Маргулис. - М : Высшая школа, 1984. - 272 с.

66. Марукович, Е.А. Износостойкие сплавы[Текст]/ Е.А. Марукович, М.И. Карпенко. -М: Машиностроение, 2005. - 428с.

67. Махкамов К.Х. Расчет износостойкости машин. Учебное пособие. [Текст] / К.Х. Махкамов. - Ташкент: ТашГТУ, 2002. - 144 с.

68. Методические указания. Методы экспериментальной оценки фрикционной совместимости материалов трущихся сопряжений. РД 50-662-88 [Текст] / М: Издательство стандартов, 1988. - 31 с.

69. Мишенин, Д.Н. Исследование процесса активации смазочных материалов лазерным излучением и повышение эксплуатационных параметров трибомеханических систем в приборостроении: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.11 [Текст] / Мишенин Дмитрий Николаевич Москва, -2000 – 193с.

70. Насибуллаева, Э.Ш. Динамика пузырькового кластера в акустическом поле [Текст] /Э.Ш. Насибуллаева, И.Ш. Ахатов // Акустический журнал. - 2005. - № 51– С. 813-821.

71. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах [Текст] / Б.Г. Новицкий.– М: Химия, 1983.– 192 с.

72. Нуруллаева, З.В. Эксплуатационные свойства смазочных масел и улучшение их присадками [Текст] / З.В.Нуруллаева, Ш.К.Бакиева, М.Т.Суяров// Молодой ученый. — 2016. — №8. — С. 274-276.

73. Обзор работ по воздействию ультразвука на нефтяные системы [Текст] /А. А. Верховых, А.К.Вахитова, А.А. Елпидинский // Вестник технологического университета. - 2016. - Т.19- №8.- С.37-42.

74. Оценка влияния антифрикционной присадки на экономические, мощностные и экологические показатели двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.Б. Лагузин и др. // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 50-58.

75. Патент РФ на полезную модель № 19100. Магнитоактиватор для омагничивания смазочных материалов / В.А. Аметов и др.; Заявл. 24.01.2001; Оpubл. 10.08.2001, Бюл. №22.

76. Патент РФ на полезную модель № 30867. Устройство для обработки смазочных масел/В.А. Аметов и др.;Заявл. 04.01.2003; Оpubл. 10.07.2003, Бюл. №19.

77. Патент РФ на полезную модель № 59198. Электронный регулятор трения / Д.Н. Любимов и др.;Заявл. 25.07.2005;Оpubл. 10.12.2006, Бюл № 34.

78. Патент РФ на полезную модель № 94286. Устройство, обеспечивающее защиту от износа трущихся деталей /С.Н. Удодов, Н.С.Луцев; Заявл. 31.08.2009; Оpubл. 05.20.2010,

79. Патент РФ на полезную модель № 134593. Система смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания / А.С. Денисов и др.; Заявл.19.03.2013; Оpubл. 20.11.2013, Бюл. № 32.

80. Патент РФ № 2054030 Металлоплакирующий смазочный состав / А.П. Ильин и др.; Заяв. 22.05.1990, Оpubл. 10.02.1996, Бюл. № 4

81. Патент РФ №2055863. Способ регенерации отработанных минеральных масел и установка для его осуществления / А.П. Картошкин и др.;Заявл. 02.06.1992;Оpubл. 10.03.1996.

82. Патент РФ № 2135638. Способ образования защитного покрытия, избирательно компенсирующего износ поверхностей трения и контакта деталей машин / И.В. Никитин; Заявл. 26.11.1998; Оpubл. 27.08.1999, Бюл. № 21.

83. Патент РФ № 2224586. Активатор жидкости / В.А. Романов, А.А и др.;Заявл. 11.11.2002; Оpubл. 27.02.2004, Бюл. № 6.

84. Патент РФ № 2224627. Способ обработки поверхности детали пары трения и устройство для его осуществления / Н.Г. Макаренко и др.; Заявл. 08.08.02; Оpubл. 27.02.2004, Бюл. № 6.

85. Патент РФ № 2268440. Антифрикционный порошковый материал / А.Н. Жулин и др.; Заявл. 03.02.2005; Оpubл. 20.01.2006,Бюл. №2.

86. Патент РФ № 2277579. Металлсодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов. / В.Г. Бабель и др.; Заявл. 26.05.2005; Оpubл. 10.06.2006,Бюл. №16.

87. Патент РФ № 2290429. Способ получения присадки к смазочным материалам и устройство для его осуществления / Г.М. Яковлев, Л.Е. Цой; Заяв. 21.01.2005; Оpubл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

88. Патент РФ №2345176. Способ формирования восстанавливающего антифрикционного и износостойкого покрытия для узлов и деталей машин и механизмов / С.Н. Подчуфаров; Заявл. 12.02.2008; Оpubл. 27.01.2009, Бюл. № 3.

89. Патент РФ № 2355922. Композиция металлосодержажщей присадки / С.П. Иванов и др.; Заявл. 18.06.2007; Оpubл. 20.05.2009, Бюл. № 14.

90. Патент РФ № 2398010. Металлоплакирующая многофункциональная композиция для моторных, трансмиссионных и индустриальных масел. / В.Г. Бабель, Д.Н. Гаркунов; Заявл. 06.03.2009; Оpubл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

91. Патент РФ № 2415907. Антифрикционная композиция / Д.А. Гительман; Заявл. 10.06.2009; Оpubл. 10.04.2011, Бюл. № 10.

92. Патент РФ № 2416090. Способ и устройство для измерения поверхностного натяжения жидкостей / Д.Штюманн, Р. Мюнцнер; Заявл. 21.02.2006; Оpubл. 27.03.2011, Бюл. № 10

93. Патент РФ № 2428597. Способ формирования безызносных пар трения и устройство для его осуществления / Ю.А. Семенов, А.С. Таранов; Заявл. 09.04.2010; Оpubл. 10.09.2011, Бюл. № 25.

94. Патент РФ № 2439198. Способ получения износостойкого композиционного наноструктурированного покрытия / Е.Ю. Земляничин и др.; Заявл. 20.09.2008; Оpubл. 10.04.2010, Бюл. № 1.

95. Патент РФ № 2449006. Композиции смазочных масел, содержащие титан / Г.Х. Гинтер; Заявл. 05.12.2007; Оpubл. 27.04.2012, Бюл. № 12.

96. Патент РФ № 2493380. Устройство адаптивного управления смазочным действием / Д.Н. Любимов и др.; Заявл. 29.03.2012г; Оpubл. 20.09.2013, Бюл. № 26.

97. Патент РФ № 2503877. Система подачи смазочного материала в двигатель внутреннего сгорания / А.С. Денисов и др.; Заявл. 17.07.2012; Оpubл. 10.01.2014, Бюл. № 1

98. Патент РФ № 2514189. Способ повышения износостойкости пар трения / Б.И. Ковальский и др.; Заявл. 05.04.2013; Оpubл. 27.04.2014, Бюл. № 23.

99. Патент РФ № 2527243. Триботехническая композиция для металлических узлов трения / Е.М. Ежунов, И.В. Захаров; Заявл. 25.02.2013; Оpubл. 27.08.2014, Бюл. № 24.

100. Патент РФ № 2591918. Способ диспергирования наноразмерного порошка меди в базовом моторном масле/ Н.С. Хитерхеева и др.; Заяв. 08.12.2014;Опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.

101. Патент РФ 2690193. Способ внесения мелкодисперсных материалов в жидкости / А.А. Симдянкин, И.А. Успенский, М.Н. Слюсарев; Заяв. 01.08.2018; Опубл.31.05.2019, Бюл. № 16.

102. Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов [Текст] / А.Т. Лебедев, А.Г. Арженовский // Технический сервис машин. Выпуск №1 (123) - Москва, 2019 - С. 46-52

103. Повышение надежности двигателей автомобилей введением антифрикционных присадок в условиях эксплуатации [Текст] / С.М. Гайдар и др. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. №4(28). С. 35-44.

104. Повышение экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания в условиях эксплуатации [Текст] / А.Б. Лагузин и др. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. №3 (27). С. 53-62

105. Покровская, С.В. Ультразвуковая кавитационная обработка коллоидных систем смазочных материалов [Текст] /С.В.Покровская, Н.В.Ощепкова, А. В. Завадский, Ю.А. Булавка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки.– 2012 . – № 3. - С. 109-113.

106. Проактивное моделирование динамической сложности агротехноцинозов [Текст] / А.М. Башилов, В.А. Королев, А.Г. Арженовский и др. // Вестник аграрной науки Дона. Выпуск №3 (51) Зерноград, 2020 - С.45 - 54.

107. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания: пер. с нем. [Текст]/ Г.Польцер, Ф Майснер. - М: Машиностроение, 1984. - 264с.

108. Полюшкин, Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки. Учебное пособие [Текст] / Н.Г. Полюшкин.- Красноярск: изд. Красноярск.гос. агр. ун-та, 2013. - 192 с.

109. Петровская, Е.А. Обеспечение высокой износостойкости пар трения [Текст]/ Е.А. Петровская // В сборнике: Проблемы и перспективы

развития агропромышленного комплекса России. Материалы всероссийской научно-технической конференции. 8-ми томах. 2017. С. 70-72.

110. Пуков Р.В. Улучшение показателей автотракторных дизельных двигателей путем ультразвуковой обработки топлива : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 [Текст] /Пуков Роман Владимирович. - Рязань, 2018. - 166 с.

111. Путинцев, С.В. Введение в трибологию поршневых двигателей. Учебник [Текст] С. В. Путинцев. — М: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 184 с.

112. Ресурсосберегающие методы испытания двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин [Текст] / В.П. Забродин, Н.В. Валувев, А.Г. Арженовский // Вестник аграрной науки Дона. Выпуск №4 (40) Зерноград, 2017 - С.47 - 51.

113. Рекомендации по метрологии. Р 50.2.076-2010 ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Плотность нефти и нефтепродуктов. Методы расчета. Программы и таблицы приведения. [Текст] / М: Союзинформ, 2011. - 141 с.

114. Розенберг, Л.Д. Кавитационная область. Мощные ультразвуковые поля [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М: Наука, 1968. – Ч. 6. – С. 221–266.

115. Семёнов, А.П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы [Текст]/ А.П.Семёнов // Трение и смазка в машинах и механизмах.-2007.- № 12.-С. 21-36.

116. Сергиенко, В.П. Вибрация и шум в нестационарных процессах трения [Текст]/ В.П.Сергиенко, С.Н. Бухаров.- Минск: Беларус. Наука, 2012. – 346 с.

117. Симдянкин, А.А. Оценка влияния ультразвуковой обработки моторного масла на износ пар трения при длительных износных испытаниях[Текст] / А.А. Симдянкин, А.М.Давыдкин, М.Н. Слюсарев, А.М. Земсков //Вестник Мордовского университета, Том. 28, № 4. 2018. – С.583-602

118. Симдянкин, А.А. Коэффициент поверхностного натяжения как показатель трибологических свойств моторного масла и его зависимость от

температуры.[Текст] / А.А. Симдянкин, М.Н. Слюсарев // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материал Междунар. науч.-практ. конф. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2018. С. 19-25.

119. Симдянкин, А.А. Оценка влияния параметров ультразвука на изменение коэффициента поверхностного натяжения при ультразвуковой обработке моторного масла [Текст] / А.А. Симдянкин, М.Н. Слюсарев // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материал Междунар. науч.-практ. конф. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2018. С. 13-18.

120. Симдянкин, А.А. Способ внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки с помощью акустической кавитации [Текст] / А.А. Симдянкин, М.Н. Слюсарев // Нива Поволжья. 2018. № 4 (49). С. 154-161.

121. Симдянкин, А.А. Воздействие ультразвуковой обработки смазочного масла на работу трибосопряжения с оценкой остаточных эффектов в масле/А.А. Симдянкин, И.А. Успенский, Н.В.Бышов, М.Н. Слюсарев // Трение и Износ. - Том 40, № 5 - 2019. - С. 599-606.

122. Симдянкин, А.А. Обработка смазочного масла ультразвуком при проведении триботехнических испытаний /А.А.Симдянкин, И.А. Успенский, В.М.Пащенко, А.В.Старунский // Трение и Износ. – Том 38, № 4 —2017. – С.358-363.

123. Симдянкин, А.А. Оценка влияния параметров ультразвука на смазочные свойства моторных масел и износ узлов трения при ультразвуковой обработке масел [Текст] / А.А. Симдянкин, И.А. Успенский, М.Н. Слюсарев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева.– 2021. – № 1(49). – С. 155-160

124. Симдянкин А.А. Исследование влияния параметров ультразвука на вязкость масла при ультразвуковой обработке дизельных моторных масел [Текст] / А.А Симдянкин, М.Н. Слюсарев // Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного

агропромышленного комплекса: Материалы Национальной научно-практической конференции – Рязань: . – РГАТУ, 2020 – С. 407-411.

125. Симдянкин А.А. Оценка эффективности ультразвуковой обработки моторного масла путем физического моделирования работы агрегатов дизельных двигателей мобильной сельхозтехники при стендовых испытаниях [Текст] / А.А. Симдянкин, М.Н. Слюсарев // Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса: Материалы Национальной научно-практической конференции – Рязань: . – РГАТУ, 2020 – С. 412-416.

126. Сиротюк, М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. Мощные ультразвуковые поля [Текст] / М.Г. Сиротюк, под ред. Л.Д. Розенберга. – М: Наука, 1968. – Ч. 5. – С. 168 – 220.

127. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость [Текст] / В.П. Скрипов. - М: Наука, 1972. - 307 с.

128. Слюсарев, М.Н. Определение поверхностного натяжения жидкостей методом отрыва кольца. [Текст] / М.Н. Слюсарев // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Межвузовский сборник научных трудов Саранск : Издательство Мордовского университета, 2017 - С. 93-99.

129. Слюсарев, М.Н. Применение кавитационных технологий в промышленности и сельском хозяйстве [Текст] / М.Н.Слюсарев // Материалы 68-ой международной научно-практической конференции «Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве». - Рязань: Издательство РГАТУ. - 2017- Часть 2.- С. 308-313.

130. Слюсарев М.Н. Влияние ультразвуковой обработки моторного масла на износостойкость агрегатов двигателей мобильной техники при стендовых испытаниях [Текст] / М.Н. Слюсарев // Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта – Рязань: . – РГАТУ, 2020 – С. 273-277.

131. Смирнов, А.Н. Супранамолекулярные комплексы воды [Электронный ресурс]/ А.Н. Смирнов, Б.В. Лапшин, А.В. Балышев, И.М. Лебедев, А.В. Сыроешкин// Электронный журнал «Исследовано в России», 2004 -№ 7 - с. 413-424. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/038.pdf>
132. Создание веб-сервиса мониторинга мобильной сельскохозяйственной техники / Щукина В.Н. Матвеев А.И., Девянин С.Н.// В сборнике Доклады ТСХА. 2020. С. 232-236.
133. Спицын, И.А. Сельскохозяйственная техника и технологии. [Текст] / И.А. Спицын, А.Н. Орлов, В.В. Ляшенко и др. - М: Колосс, 2006. - 646 с.
134. Справочник по триботехнике: Т.1 Теоретические основы. [Текст]/ Под общ.ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989.– 400 с.
135. Стрельцов, В.В. Ускорение приработки деталей во время стендовой обкатки отремонтированных двигателей внутреннего сгорания (на примере ЗМЗ - 53 ЗИЛ - 130): дисс....д-ра техн. наук / В.В. Стрельцов - М: МГАУ, 1993. - 217 с.
136. Суркин, В. И. Основы теории и расчёта автотракторных двигателей. Курс лекций. Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп.[Текст]/ В.И.Суркин. - СП-б:Лань,2019.-304с.
137. Сытин А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 [Текст] / Сытин Антон Валерьевич. - Бийск, 2007. - 148с.
138. Тракторы МТЗ-80 и МТЗ-82 [Текст] - М.: Колос, 1975. - 248 с.
139. Телематика и диагностика транспортных средств [Текст]/ Щукина В.Н., Девянин С.Н., Зейлигер А.М. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии космический мониторинг. 2018. № 3. С. 81-85.
140. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение [Текст]/ под.ред. В.М. Бузника. - Томск: Изд-во НТЛ, 2009. - 192 с.
141. Уханов, А.П. Сафлоровое биотопливо: Монография [Текст] / А.П. Уханов , Д.А.Уханов, И.Ф. Адгамов. - Пенза: РИО ПГАУ, 2020. - 208с.

142. Федоренко, В.Ф. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе [Текст] / В.Ф. Федоренко, М.Н. Ерохин, В.И. Балабанов, Д.С. Буклагин, И.Г. Голубев, С.А. Ищенко. - М: ФГБНУ "Росинформагротех", 2011. - 312 с.

143. Федоткин, И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть II [Текст]/ И.М. Федоткин, И.С. Гулый. –Киев: ОКО, 2000. – 898 с.

144. Фещенко, В.Н. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы. [Текст]/ В.Н. Фещенко. – М: Инфра-Инженерия, 2016. – 400 с.

145. Хайдаров, Г.Г. О связи поверхностного натяжения жидкости с теплотой парообразования [Текст]/ Г.Г. Хайдаров // Журнал физической химии, Т.LVII, №10, 1983. – С.2528-2530.

146. Хатилов, С.А. Новый класс износостойких материалов, полученных радиационной модификацией политетрафторэтилена в расплаве [Текст] / С.А. Хатилов, С.А. Серов, Н.В. Садовская //Вопросы материаловедения. 2012. №4. С. 191-201.

147. Хмелев В.Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и дисперсных жидких сред [Текст] /В.Н. Хмелев и др. //Ползуновский Вестник, № 4, Т.2, 2014, с.110-115

148. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка).2-е изд. переработ. и доп. [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.Д Браун, Н.А. Буше и др., Под общ.ред. А.В. Чичинадзе. - М: Машиностроение, 2003. - 576 с.

149. Шестаков, С.Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие [Электронный ресурс] / С.Д. Щербаков // Электронный журнал "Техническая акустика". 2010, № 14, - С.2-16.<http://www.ejta.org>

150. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука: учебное пособие [Текст]/ В.А. Шутилов. - Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. - 280 с.

151. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия: учебник для бакалавров [Текст] / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. — М: Издательство Юрайт, 2012. — 444 с.

152. Эксплуатационные материалы: учебник[Текст] / А.П. Уханов , Д.А.Уханов, А.А. Глущенко, А.Л. Хохлов. - Санкт-Петербург: Лань, 2019. - 528с.
153. Прокопцова, М.Д. Склонность моторного масла М10Г₂ к образованию низкотемпературных отложений в дизелях / М.Д. Прокопцова, Д.А. Уханов, И.Д. Глазунов // Труды 25 ГосНИИ МО РФ - Вып. 59. - С.272-280.
- 154 Прокопцова, М.Д. Методы оценки склонности моторных масел к образованию низкотемпературных отложений / М.Д. Прокопцова, К.В. Шаталов, Д.А. Уханов // Дизелестроение. - 2020. - №3. - С.21-27.
155. Петровский, Д.И. Как повысить противоизносные свойства трибологических смазок / Д.И. Петровский // Сборник: Проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса России. Материалы всероссийской научно-практической конференции. В 8-ми томах. 2017. С. 67-69.
156. Akiyama M. Spherical bubble collapse in uniformly subcooled liquids. Bulletin of JSME, The Japan Society of Mechanical Engineers, 1965, vol.8, n.32, 683-694.
157. Gaidar, S.M. Laboratory study of tribological characteristics of innovative lubricant coolants / S.M. Gaidar, A.V. Pydrin, M.Y. Karelina, M.S. Gaidar, A.V. Sukhodolya // Materials Science Forum. 2020. T. 992 MSF. С. 590-597.
158. Floris F.M. Modeling the Cavitation Free Energy // The Journal of Physical Chemistry 109 (50), B2005, 24061-24070.
159. Flynn G., Physics of acoustic cavitation in liquids. In: W. Mason (ed.) Physical acoustics, vol. 1 B, (Academic Press, 1964) pp. 7-138
160. Hickling R. Some physical effects of cavity collapse in liquids. Transaction of the ASME, ser.D, Journal of Basic Engineering, 1966, vol.88,n.1, 229-235.
161. Neppiras E.A. Acoustic cavitation // Phys. Repts. - 1980. - V. 61, N 3. - P.159 - 251.
162. Pearsall S., Cavitation. Mills and Boon Limited London, 1972.

163. Prakash S., Ghosh A.K. Ultrasonics and colloids. (Monograph).Asia Publishing House, London, 1962.

164. Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases / Fan X., Li h. and tct. // Tribology International. - 2018. - Vol. 118. - P. 128-139.

165. Qualitative modeling of Liquids Aperture of Discontinuity During the Acoustic Cavitation /A. Simdiankin, I. Uspensky, I. Danilov and M. Slyusarev// 2nd IAA/AAS Conference on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials RUDN, Moscow, 2019, Published - San Diego, 2021 - pp.631-642. Web Site: <http://www.univelt.com>

166. Reynolds O., The causes of the racing of the engines of screw steamers Investigated theoretically and by experiment Tr. Inst. Naval Arch. V14 Sc. Papers, 1, 56—57, 1873

167. A.A.Simdiankin and M.N. Slyusarev. Study of the Influence of the Parametres of Ultrasonic Treament of Motor Oil on the Wear of Friction Paris during the Burn-In Period. /Jornal of Friction and Wear, 2019 Vol. 40, No. 4, pp. 368-373.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2690193

**СПОСОБ ВНЕСЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В ЖИДКОСТИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П.А. Костычева" (RU)*

Авторы: *Симдянкин Аркадий Анатольевич (RU), Успенский
Иван Алексеевич (RU), Слюсарев Михаил Николаевич (RU)*

Заявка № 2018128265

Приоритет изобретения 01 августа 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 августа 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 690 193** (13) **C1**

(51) МПК
C10M 177/00 (2006.01)
C10M 125/04 (2006.01)
B22F 9/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК
C10M 177/00 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018128265, 01.08.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 01.08.2018

Дата регистрации:
 31.05.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.08.2018

(45) Опубликовано: 31.05.2019 Бюл. № 16

Адрес для переписки:
 390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1, ФГБОУ ВО
 РГАТУ им. П.А. Костычева, отдел
 патентования, Безносюк Р.В.

(72) Автор(ы):

Симдянкин Аркадий Анатольевич (RU),
 Успенский Иван Алексеевич (RU),
 Слюсарев Михаил Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Рязанский государственный
 агротехнологический университет имени
 П.А. Костычева" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2591918 C2, 20.07.2016. RU
 2055479 C1, 10.03.1996. RU 2359245 C1,
 20.06.2009. RU 2054030 C1, 10.02.1996. RU
 2290429 C2, 27.12.2006. BY 16770 C1,
 28.02.2013.

(54) СПОСОБ ВНЕСЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЖИДКОСТИ

(57) Формула изобретения

1. Способ внесения в жидкости, в частности в жидкие смазки, мелкодисперсных материалов, включающий помещение жидкости в емкость и воздействие на нее акустическими колебаниями, вызывающими кавитацию, диспергирующую вносимые в жидкость модифицирующие добавки, отличающийся тем, что модифицирующие добавки формируются непосредственно в процессе кавитационного износа вносимых в жидкость, в область максимального воздействия кавитации, металлических материалов, подвергающихся в этой области эрозии, при этом частицы износа, имеющие ювенильную поверхность, диспергируются по всему объему жидкости как за счет воздействия кавитации, так и дополнительного перемешивания.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в зависимости от достигнутого уровня соответствия требуемых и получаемых в процессе эрозии и диспергирования характеристик жидкости производится периодическое отключение/включение источника кавитации, а также выведение/введение из зоны кавитации модифицирующих материалов.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А



ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 - Значения коэффициента поверхностного натяжения σ минерального моторного масла «LukoilDIESELOIL» 10W-40 при изменении $T^{\circ}\text{C}$

T ($^{\circ}\text{C}$)	Метод капель $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Метод кольца $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Обобщенное $\sigma_{\text{об}}$ (мН/м)
20	38,22	39,18	38,70
25	37,17	37,92	37,55
30	36,22	36,99	36,60
35	35,16	36,06	35,61
40	34,11	34,92	34,52
45	33,05	33,82	33,43
50	32,10	33,00	32,55

Таблица Б.2 - Значения коэффициента поверхностного натяжения σ полусинтетического масла «SHELLHelixHX7 Diesel» при изменении $T^{\circ}\text{C}$

T ($^{\circ}\text{C}$)	Метод капель $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Метод кольца $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Обобщенное $\sigma_{\text{об}}$ (мН/м)
20	37,08	38,00	37,54
25	36,01	36,83	36,42
30	34,96	35,79	35,37
35	33,90	34,81	34,36
40	32,94	33,71	33,32
45	31,78	32,67	32,23
50	30,63	31,41	31,02

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.3 - Значения коэффициента поверхностного натяжения σ синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 при изменении $T^{\circ}\text{C}$

T ($^{\circ}\text{C}$)	Метод каплеь $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Метод кольца $\sigma_{\text{ср}}$ (мН/м)	Обобщенное $\sigma_{\text{об}}$ (мН/м)
20	35,01	36,10	35,55
25	33,74	34,73	34,23
30	32,37	33,48	32,92
35	31,21	32,37	31,79
40	30,04	31,01	30,52
45	28,75	29,76	29,25
50	27,54	28,48	28,01

Таблица Б.4 - Значения температуры T ($^{\circ}\text{C}$) масла при обработке его ультразвуком в лабораторной установке

Время (с)	Температура T ($^{\circ}\text{C}$)			Время (с)	Температура T ($^{\circ}\text{C}$)		
	$T_{\text{м}}$	$T_{\text{пс}}$	$T_{\text{с}}$		$T_{\text{м}}$	$T_{\text{пс}}$	$T_{\text{с}}$
30	21	21	21	300	24	25	25
60	21	21	21	360	26	26	27
90	21	21	21	420	27	27	28
120	22	22	22	480	29	29	30
180	22	22	23	540	31	30	31
240	23	23	23	600	31	31	33

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.5 - Значения σ и T^0 масла «LukoilDIESELOIL» 10W-40 при изменении t обработки ультразвуком

t (с)	T^0	№ п/п	Метод счета капель			Метод отрыва кольца		
			$M_{60\text{кап}}$ (г)	$m_{\text{кап.}}$ (г)	σ (мН/м)	$m_{\text{отр.}}$ (г)	$F_{\text{отр.}}$ (мН)	σ (мН/м)
0	24	1	1,164	0,01940	36,88	2,320	22,736	38,09
		2	1,174	0,01957	37,20	2,316	22,667	38,02
		3	1,164	0,01940	36,88	2,321	22,746	38,11
20	24	1	1,172	0,01953	37,12	2,320	22,736	38,09
		2	1,173	0,01955	37,16	2,311	22,648	37,94
		3	1,164	0,01940	36,88	2,310	22,638	37,92
60	24	1	1,172	0,01953	37,12	2,320	22,736	38,09
		2	1,175	0,01958	37,22	2,318	22,716	38,06
		3	1,172	0,01953	37,12	2,317	22,707	38,04
90	24	1	1,182	0,01970	37,45	2,329	22,824	38,24
		2	1,174	0,01957	37,20	2,310	22,638	37,92
		3	1,160	0,01933	36,75	2,308	22,618	37,89
120	24	1	1,166	0,01943	36,93	2,322	22,756	38,12
		2	1,164	0,01940	36,88	2,312	22,657	37,95
		3	1,186	0,01977	37,58	2,312	22,657	37,95
180	26	1	1,152	0,01920	36,49	2,275	22,295	37,35
		2	1,158	0,01938	36,69	2,296	22,500	37,70
		3	1,160	0,01933	36,84	2,300	22,540	37,76
240	28	1	1,139	0,01898	36,08	2,270	22,246	37,27
		2	1,150	0,01917	36,44	2,261	22,158	37,12
		3	1,145	0,01910	36,31	2,261	22,158	37,12
300	30	1	1,125	0,01875	35,64	2,256	22,109	37,04
		2	1,140	0,01900	36,12	2,226	21,815	36,55
		3	1,138	0,01897	36,05	2,235	21,903	36,69
360	31	1	1,122	0,01871	35,56	2,232	21,874	36,65
		2	1,130	0,01883	35,80	2,213	21,687	36,33
		3	1,130	0,01883	35,80	2,235	22,903	36,69
480	33	1	1,121	0,01868	35,52	2,200	21,560	36,12
		2	1,111	0,01852	35,20	2,204	21,600	36,18
		3	1,111	0,01852	35,20	2,204	21,600	36,18
600	35	1	1,105	0,01842	35,01	2,184	21,403	35,86
		2	1,099	0,01832	34,82	2,179	21,354	35,77
		3	1,099	0,01832	34,82	2,181	21,374	35,81

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.6 - Значения σ и T^0 масла «SHELLHelixHX7 Diesel» 10W-40 при изменении тобработки ультразвуком

t (с)	T^0	№ п/п	Метод счета капель			Метод отрыва кольца		
			$M_{60\text{кап}}$ (г)	$m_{\text{кап.}}$ (г)	σ (мН/м)	$m_{\text{отр.}}$ (г)	$F_{\text{отр.}}$ (мН)	σ (мН/м)
0	24	1	1,134	0,01890	35,92	2,264	22,193	37,18
		2	1,147	0,01911	36,32	2,269	22,239	37,26
		3	1,150	0,01917	36,44	2,259	22,145	37,10
20	24	1	1,152	0,01920	36,49	2,254	22,090	37,01
		2	1,141	0,01902	36,16	2,260	22,148	37,11
		3	1,141	0,01902	36,16	2,269	22,239	37,26
60	24	1	1,092	0,01821	34,62	2,179	21,357	35,78
		2	1,099	0,01832	34,82	2,174	21,309	35,70
		3	1,104	0,01841	35,00	2,184	21,404	35,86
90	24	1	1,105	0,01842	35,01	2,170	21,266	35,63
		2	1,101	0,01835	34,88	2,174	21,309	35,70
		3	1,100	0,01833	34,84	2,181	21,375	35,81
120	24	1	1,109	0,01849	35,14	2,175	21,315	35,71
		2	1,101	0,01835	34,88	2,184	21,404	35,86
		3	1,092	0,01821	34,62	2,184	21,404	35,86
180	25	1	1,100	0,01832	34,82	2,170	21,266	35,63
		2	1,095	0,01820	34,61	2,176	21,321	35,72
		3	1,091	0,01818	34,55	2,165	21,217	35,54
240	27	1	1,080	0,01800	34,21	2,144	21,017	35,21
		2	1,074	0,01791	34,04	2,141	20,981	35,15
		3	1,087	0,01812	34,45	2,150	21,070	35,30
300	29	1	1,072	0,01786	33,95	2,119	20,766	34,79
		2	1,067	0,01778	33,81	2,124	20,815	34,87
		3	1,064	0,01774	33,73	2,114	20,718	34,71
360	30	1	1,067	0,01778	33,81	2,101	20,589	34,49
		2	1,059	0,01766	33,57	2,105	20,629	34,56
		3	1,055	0,01759	33,45	2,111	20,688	34,66
480	32	1	1,043	0,01738	33,03	2,080	20,384	34,15
		2	1,047	0,01746	33,19	2,075	20,336	34,07
		3	1,087	0,01812	33,44	2,083	20,414	34,20
600	34	1	1,041	0,01735	32,98	2,045	20,044	33,58
		2	1,032	0,01720	32,69	2,062	20,211	33,86
		3	1,032	0,01720	32,69	2,054	20,129	33,72

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.7 -Значения σ и T^0 масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 при изменении t обработки ультразвуком

t (с)	T^0	№ п/п	Метод счета капель			Метод отрыва кольца		
			$M_{60\text{кап}}$ (г)	$m_{\text{кап.}}$ (г)	σ (мН/м)	$m_{\text{отр.}}$ (г)	$F_{\text{отр.}}$ (мН)	σ (мН/м)
0	24	1	1,080	0,01800	34,22	2,125	20,826	34,89
		2	1,075	0,01791	34,04	2,135	20,923	35,05
		3	1,075	0,01791	34,04	2,130	20,874	34,97
20	24	1	1,084	0,01806	34,33	2,155	21,119	35,38
		2	1,073	0,01788	33,98	2,124	20,814	34,87
		3	1,073	0,01788	33,98	2,124	20,814	34,87
60	24	1	1,010	0,01684	32,01	2,022	19,817	33,20
		2	1,025	0,01710	32,50	2,030	19,894	33,33
		3	1,021	0,01701	32,33	2,022	19,817	33,20
90	24	1	1,021	0,01701	32,33	2,025	19,845	33,25
		2	1,024	0,01707	32,45	2,024	19,835	33,23
		3	1,013	0,01689	32,11	2,025	19,845	33,25
120	24	1	1,026	0,01711	32,52	2,020	19,793	33,16
		2	1,016	0,01693	32,19	2,033	19,924	33,38
		3	1,016	0,01693	32,19	2,024	19,835	33,23
180	26	1	1,004	0,01674	31,82	2,000	19,600	32,84
		2	1,007	0,01679	31,92	2,000	19,600	32,84
		3	1,000	0,01666	31,68	2,000	19,600	32,84
240	28	1	0,985	0,01640	31,17	1,977	19,375	32,46
		2	0,990	0,01650	31,32	1,967	19,279	32,30
		3	0,994	0,01658	31,52	1,967	19,279	32,30
300	30	1	0,976	0,01627	30,93	1,951	19,112	32,02
		2	0,973	0,01622	30,83	1,945	19,061	31,93
		3	0,970	0,01616	30,73	1,935	18,664	31,77
360	30	1	0,970	0,01622	30,73	1,950	19,110	32,01
		2	0,978	0,01628	30,96	1,950	19,110	32,01
		3	0,970	0,01622	30,73	1,950	19,110	32,01
480	33	1	0,945	0,01580	30,03	1,900	18,623	31,20
		2	9,940	0,01566	29,90	1,908	18,701	31,33
		3	0,954	0,01590	30,23	1,908	18,701	31,33
600	35	1	0,937	0,01562	29,69	1,891	18,533	31,05
		2	0,931	0,01551	29,49	1,880	18,424	30,86
		3	0,931	0,01551	29,49	1,871	18,335	30,72

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.8 - Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от мощности и частоты ультразвука для минерального масла «LukoilDIESELOIL» 10W-40

Источник сигнала	Мощность сигнала Р, Вт	Частота сигнала F, кГц	Метод счета капель σ , мН/м	Метод отрыва кольца σ , мН/м	Обобщенное значение $\sigma_{ср}$, мН/м	Отклонение от исх., %
Лабораторная установка	10	0	37,00	38,03	37,51	0
		10	36,96	38,02	37,49	-0,05
		12	37,05	38,07	37,56	0,13
		15	33,96	35,80	37,5	-0,03
		17	37,02	37,92	37,47	-0,11
	25	0	37,00	38,03	37,51	0
		10	37,08	38,06	37,57	0,16
		12	37,1	37,99	37,54	0,08
		15	36,94	38,02	37,48	-0,08
		17	36,89	38,09	37,49	-0,05
Ванна	30	43	37,02	38,08	37,55	0,11
	50	43	36,98	38,00	37,49	-0,05

Таблица Б.9 - Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от мощности и частоты ультразвука для полусинтетического масла «SHELLHelixHX7 Diesel» 10W-40

Источник сигнала	Мощность сигнала Р, Вт	Частота сигнала F, кГц	Метод счета капель $\sigma_{ср}$, мН/м	Метод отрыва кольца $\sigma_{ср}$, мН/м	Обобщенное значение $\sigma_{об}$, мН/м	Отклонение от исх., %
Лабораторная установка	10	0	36,23	37,18	36,70	0
		10	36,27	37,12	36,69	-0,027
		12	36,25	37,15	36,70	0
		15	36,28	37,18	36,73	0,054
		17	36,24	37,14	36,69	-0,027
	25	0	36,23	37,18	36,70	0
		10	36,24	37,19	36,71	0,027
		12	36,21	37,12	36,66	-0,11
		15	34,90	35,92	35,41	-3,51
		17	34,81	35,79	35,30	-3,81
Ванна	30	43	34,76	35,81	35,28	-3,86
	50	43	34,78	35,8	32,29	-3,84

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.10 - Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от мощности и частоты ультразвука для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

Источник сигнала	Мощность сигнала Р, Вт	Частота сигнала F, кГц	Метод счета капель $\sigma_{\text{ср}}$, мН/м	Метод отрыва кольца $\sigma_{\text{ср}}$, мН/м	Обобщенное значение $\sigma_{\text{об}}$, мН/м	Отклонение от исх., %
Лабораторная установка	10	0	33,93	34,84	34,38	0
		10	33,96	34,84	34,40	0,06
		12	33,83	34,90	34,37	-0,03
		15	33,96	34,80	34,38	0
		17	33,84	34,91	34,37	-0,03
	25	0	33,93	34,84	34,38	0
		10	33,84	34,79	34,32	-0,2
		12	34,07	34,85	34,46	0,23
		15	32,43	33,20	32,81	-4,56
		17	32,31	33,09	32,70	-4,89
Ванна	30	43	32,32	33,1	32,71	-4,86
	50	43	32,3	33,08	32,69	-4,91

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.11 -Время сохранения эффекта уменьшения σ после УЗ обработки масла
«SHELLHelixHX7 Diesel» 10W-40

$t_{\text{хр}}$ (ч)	№ п/п	Метод счета капель			Метод отрыва кольца		
		$M_{60\text{кап}}$ (г)	$m_{\text{кап.}}$ (г)	σ (мН/м)	$m_{\text{отр.}}$ (г)	$F_{\text{отр.}}$ (мН)	σ (мН/м)
0	1	1,106	0,01843	35,04	2,172	21,285	35,66
	2	1,101	0,01834	34,85	2,172	21,285	35,66
	3	1,094	0,01823	34,66	2,187	21,429	35,90
24	1	1,103	0,01838	34,94	2,172	21,285	35,66
	2	1,100	0,01833	34,83	2,181	21,370	35,80
	3	1,095	0,01825	34,70	2,184	21,400	35,85
48	1	1,093	0,01822	34,64	2,170	21,266	35,63
	2	1,096	0,01827	34,76	2,175	21,315	35,71
	3	1,105	0,01842	35,03	2,182	21,380	35,82
52	1	1,093	0,01822	34,64	2,181	21,370	35,80
	2	1,101	0,01834	34,85	2,175	21,315	35,71
	3	1,102	0,01836	34,91	2,186	21,423	35,89
56	1	1,102	0,01836	34,91	2,170	21,266	35,63
	2	1,102	0,01836	34,91	2,170	21,266	35,63
	3	1,095	0,01825	34,70	2,188	21,446	35,93
60	1	1,118	0,01864	35,43	2,205	21,609	36,20
	2	1,111	0,01851	35,18	2,208	21,643	36,26
	3	1,115	0,01860	35,35	2,207	21,626	36,23
64	1	1,128	0,01881	35,75	2,224	21,793	36,51
	2	1,123	0,01871	35,57	2,231	21,864	36,63
	3	1,124	0,01873	35,60	2,224	21,793	36,51
68	1	1,135	0,01890	35,92	2,240	21,952	36,78
	2	1,132	0,01886	35,86	2,247	22,026	36,90
	3	1,130	0,01883	35,80	2,231	21,864	36,63
72	1	1,142	0,01904	36,20	2,245	22,001	36,86
	2	1,139	0,01898	36,08	2,253	22,085	37,00
	3	1,135	0,01890	35,92	2,260	22,148	37,11
76	1	1,152	0,01920	36,49	2,258	22,133	37,08
	2	1,141	0,01902	36,16	2,260	22,148	37,11
	3	1,141	0,01902	36,16	2,269	22,239	37,26
80	1	1,134	0,01890	35,92	2,260	22,148	37,11
	2	1,147	0,01911	36,32	2,260	22,148	37,11
	3	1,150	0,01917	36,44	2,260	22,148	37,11

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.12 - Время сохранения эффекта уменьшения σ после УЗ обработки масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

$t_{\text{хр}}$ (ч)	№ п/п	Метод счета капель			Метод отрыва кольца		
		$M_{60\text{кап}}$ (г)	$m_{\text{кап.}}$ (г)	σ (мН/м)	$m_{\text{отр.}}$ (г)	$F_{\text{отр.}}$ (мН)	σ (мН/м)
0	1	1,015	0,01690	32,13	2,024	19,835	33,23
	2	1,022	0,01703	33,37	2,020	19,793	33,16
	3	1,020	0,01700	32,31	2,031	19,907	33,35
24	1	1,021	0,01702	32,35	2,025	19,845	33,25
	2	1,018	0,01697	32,26	2,025	19,845	33,25
	3	1,017	0,01696	33,22	2,024	20,835	33,23
48	1	1,016	0,01693	32,18	2,022	19,823	33,21
	2	1,025	0,01710	32,50	2,028	19,877	33,30
	3	1,017	0,01696	32,22	2,022	19,823	33,21
72	1	1,019	0,01698	32,28	2,021	19,805	33,18
	2	1,019	0,01698	32,28	2,023	19,829	33,22
	3	1,019	0,01698	32,28	2,030	19,894	33,33
76	1	1,029	0,01715	32,74	2,066	20,247	33,92
	2	1,047	0,01746	33,19	2,068	20,270	33,96
	3	1,040	0,01734	32,97	2,061	20,199	33,84
80	1	1,074	0,01773	33,71	2,100	20,580	34,48
	2	1,059	0,01765	33,55	2,088	20,462	34,28
	3	1,052	0,01753	33,45	2,111	20,688	34,66
84	1	1,065	0,01780	33,83	2,115	20,727	34,72
	2	1,073	0,01789	34,00	2,124	20,820	34,88
	3	1,062	0,01771	33,66	2,105	20,683	34,65
88	1	1,084	0,01806	34,33	2,136	20,939	35,08
	2	1,073	0,01788	33,98	2,125	20,825	34,89
	3	1,073	0,01788	33,98	2,130	20,873	34,97
92	1	1,079	0,01799	34,20	2,138	20,952	35,10
	2	1,075	0,01792	34,07	2,127	20,844	34,92
	3	1,075	0,01792	34,07	2,132	20,894	35,01

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б. 13 - Зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их УЗ обработке

Вид УЗ обработки	T ⁰ (°C)	Тип и марка моторного масла							
		Минеральное				Синтетическое			
		Lukoil DIESEL oil 10W-40				ZIC X7 Diesel 10W-40			
		№ п/п	t _{исх} (с)	ν _{ср} (мм ² /с)	Δν %	№ п/п	t _{исх} (с)	ν _{ср} (мм ² /с)	Δν %
Без УЗ обработки (F=0кГц)	23	1	811,3	251,45	0	1	864,8	269,38	0
		2	805,1			2	869,4		
		3	807,6			3	862,6		
УЗ обраб. (F=12кГц)	23	1	810,1	251,14	-0,1	1	844,9	262,93	-2,2
		2	804,2			2	849,0		
		3	806,7			3	840,8		
УЗ обраб. (F=17 кГц)	23	1	814,2	252,22	+0,3	1	792,2	245,63	-8,2
		2	809,7			2	789,3		
		3	807,5			3	786,4		
Без УЗ обработки (F=0кГц)	40	1	296,9	91,93	0	1	313,0	97,91	0
		2	295,5			2	314,6		
		3	293,8			3	316,3		
УЗ обраб. (F=12кГц)	40	1	294,5	92,11	+0,2	1	309,9	96,74	-1,2
		2	296,9			2	310,0		
		3	296,6			3	312,7		
УЗ обраб. (F=17 кГц)	40	1	295,7	92,02	+0,1	1	289,4	90,46	-7,6
		2	295,0			2	292,1		
		3	296,4			3	290,6		

Т а б л и ц а Б. 14 - Результаты взвешивания колодок и роликов до и после длительных износных испытаний

Частота обработки, кГц	Образец	Масса образцов до испытаний, г		Масса образцов после испытаний, г		Отклонение относительно исходной массы, 10 ⁻³ г	Отклонение относительно необработанного масла, %
		каждого из трех	средняя	каждого из трех	средняя		
-	Ролик	79,00608 79,00607 79,00603	79,006 06	79,00450 79,00465 79,00460	79,004 58	1,48	-
	Колодка	10,52148 10,52145 10,52148	10,521 47	10,52014 10,52020 10,52012	10,520 15	1,32	-
17	Ролик	80,06558 80,06555 80,06551	80,065 55	80,06418 80,06422 80,06426	80,064 22	1,33	-10,14
	Колодка	10,62956 10,62958 10,62954	10,629 56	10,62853 10,62848 10,62846	10,628 49	1,07	-18,94

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б. 15 - Результаты испытаний компрессора без УЗ обработки масла

Без УЗ обработки масла	№ замера	Вес поршневых колец компрессора г		
		Верхнее компрес- сионное	Нижнее компрес- сионное	Масло- съемное
до испытаний	1	8,60787	8,55197	13,55944
	2	8,61421	8,55364	13,56092
	3	8,61256	8,54984	13,56201
Среднее арифметическое г		8,61154	8,55182	13,56079
Среднее квадратическое отклонение (σ) г		0,00329	0,00191	0,00129
Коэффициент вариации (V) %		0,039	0,022	0,009
после испытаний	1	8,52838	8,47961	13,44004
	2	8,53178	8,48261	13,43745
	3	8,53006	8,48528	13,44287
Среднее арифметическое г		8,53007	8,48250	13,44012
Среднее квадратическое отклонение (σ) г		0,00170	0,00284	0,00271
Коэффициент вариации (V) %		0,019	0,033	0,020
Весовой износ (Δ) г		0,08147	0,06932	0,12167

Таблица Б. 16 - Результаты испытаний компрессора с УЗ обработкой масла

С УЗ обработкой масла	№ замера	Вес поршневых колец компрессора г		
		Верхнее компрес- сионное	Нижнее компрес- сионное	Масло- съемное
до испытаний	1	8,49637	8,56909	13,49156
	2	8,50705	8,56141	13,49318
	3	8,50648	8,56282	13,50038
Среднее арифметическое г		8,50330	8,56444	13,49504
Среднее квадратическое отклонение (σ) г		0,00601	0,00409	0,00294
Коэффициент вариации (V) %		0,071	0,048	0,022
после испытаний	1	8,44392	8,51474	13,40510
	2	8,44303	8,51986	13,41543
	3	8,45432	8,50899	13,41127
Среднее арифметическое г		8,44709	8,51453	13,41057
Среднее квадратическое отклонение (σ) г		0,00627	0,00543	0,00520
Коэффициент вариации (V) %		0,074	0,063	0,039
Весовой износ (Δ) г		0,05621	0,04991	0,08447

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.17 - Себестоимость ремонта компрессора А29.01.000

Показатели	Стоимость, руб
Себестоимость ремонта компрессора, в том числе:	3369,5
Зарплата.	868,5
Стоимость запчастей.	2090
Прочие расходы.	411

Таблица Б.18 - Стоимость внедрения устройства периодической УЗ обработки масла в систему смазки компрессора А29.01.000

Наименование	Стоимость, руб
Корпус УЗГ	420
Комплектующие для УЗГ	1720
Монта и сборка УЗГ	750
УЗ излучатель	320
Инвертор автомобильный 24В на 220В	1160
Расходные материалы для установки УЗГ с излучателем	720
Работы по установке УЗГ с излучателем	1150
ИТОГО;	6240

ПРИЛОЖЕНИЕ В

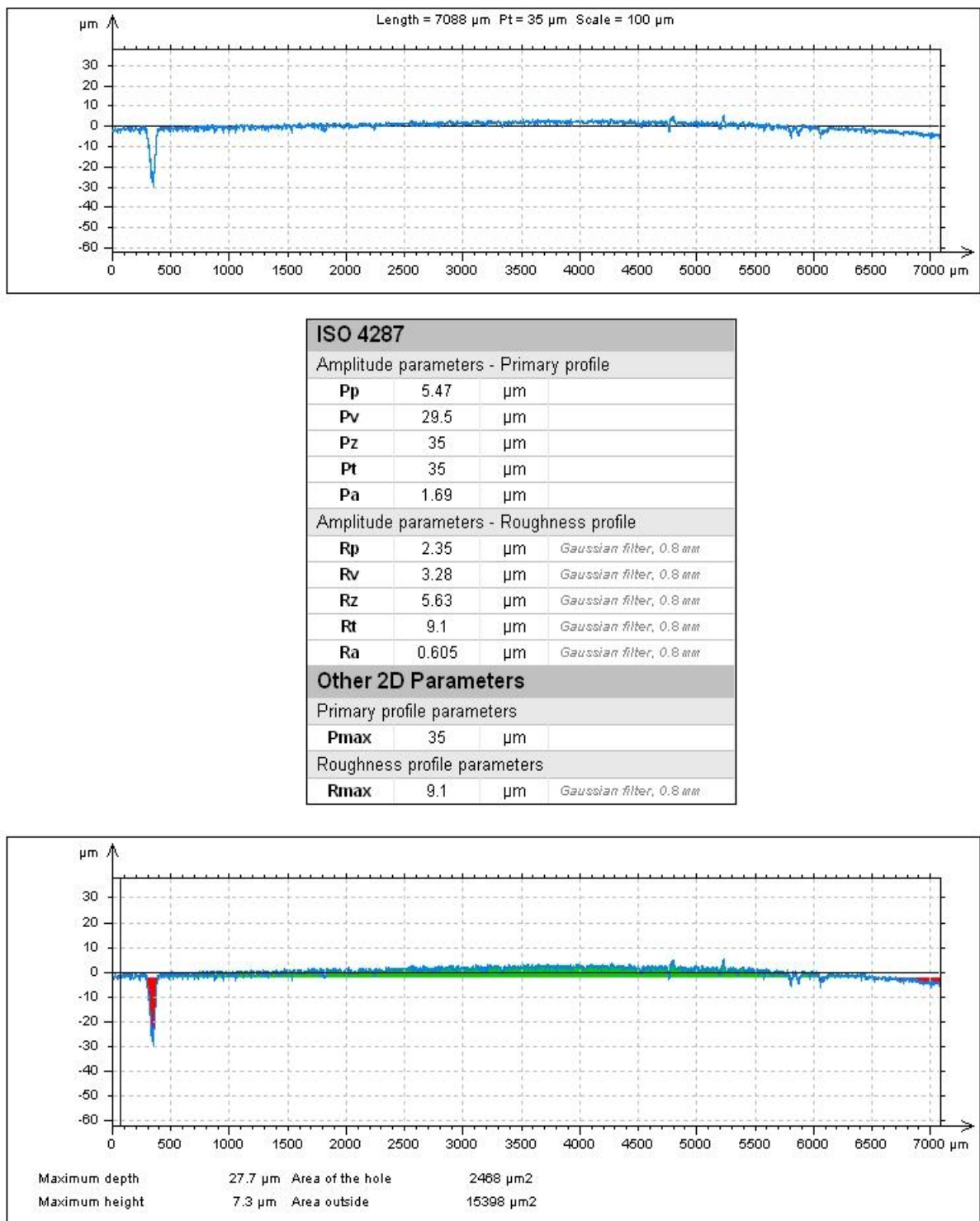
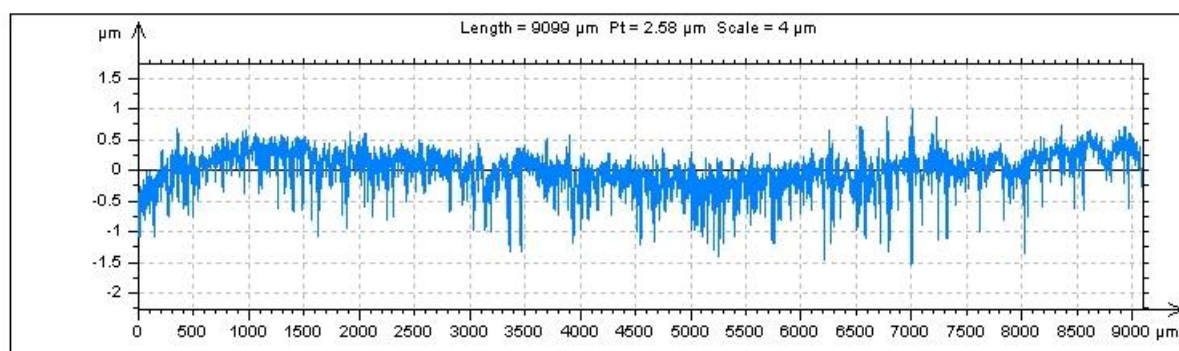


Рисунок В.1 а) - Профилограмма рабочей поверхности колодки, подготовленной для длительных износных испытаний с обработкой масла ультразвуком

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В



ISO 4287			
Amplitude parameters - Primary profile			
Pp	1.02	μm	
Pv	1.55	μm	
Pz	2.58	μm	
Pt	2.58	μm	
Pa	0.243	μm	
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.622	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	1.16	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	1.78	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rt	2.56	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.181	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Other 2D Parameters			
Primary profile parameters			
Pmax	2.58	μm	
Roughness profile parameters			
Rmax	2.56	μm	Gaussian filter, 0.8 mm

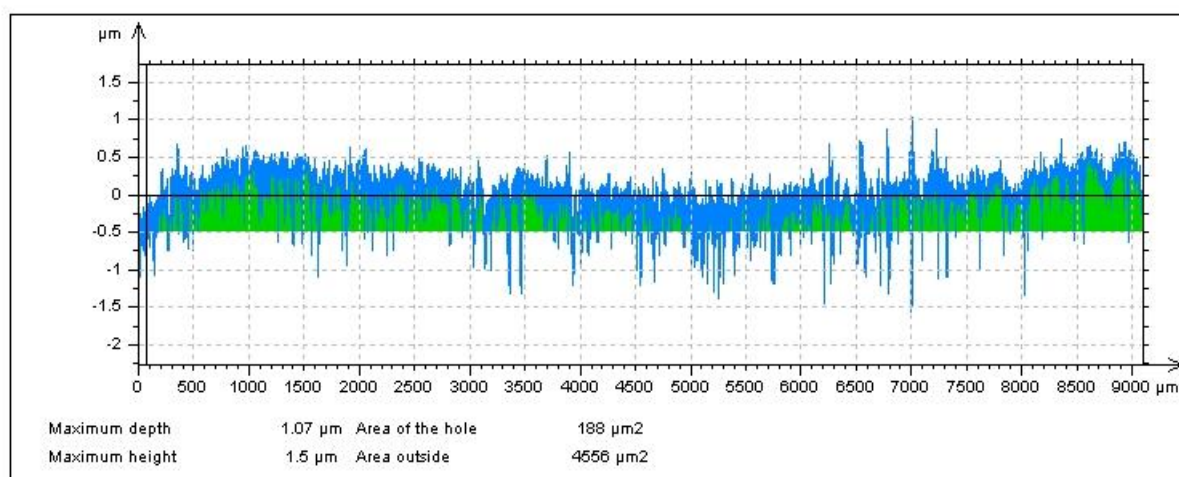
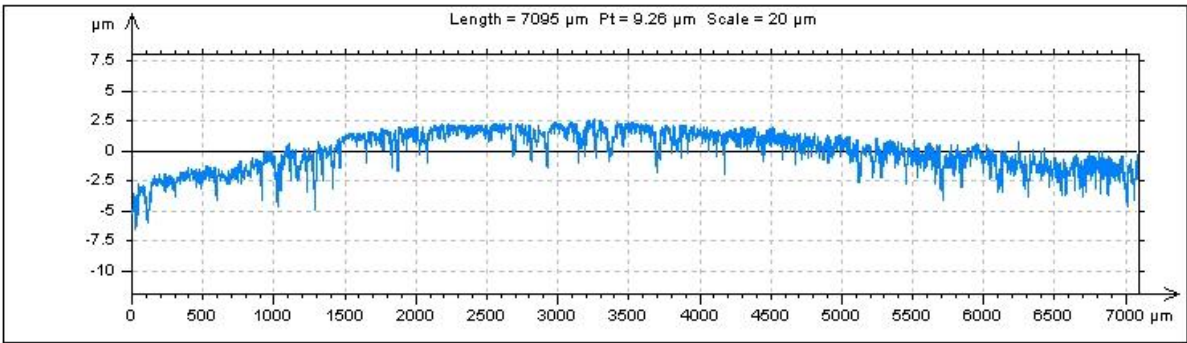


Рисунок В.1 б) - Профилограмма рабочей поверхности ролика, подготовленного для длительных износных испытаний с обработкой масла ультразвуком

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В



ISO 4287				
Amplitude parameters - Primary profile				
Pp	2.7	µm		
Pv	6.56	µm		
Pz	9.26	µm		
Pa	1.38	µm		
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	1.12	µm		Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	3.2	µm		Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	4.31	µm		Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.518	µm		Gaussian filter, 0.8 mm
Other 2D Parameters				
Primary profile parameters				
Pmax	9.26	µm		
Roughness profile parameters				
Rmax	5.44	µm		Gaussian filter, 0.8 mm

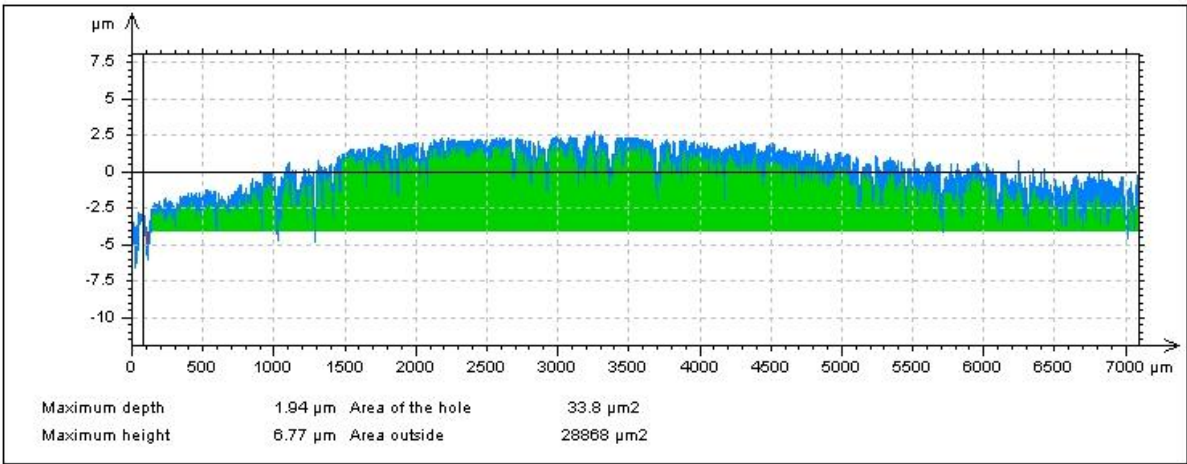


Рисунок В.2 а) - Профилограмма рабочей поверхности колодки, после длительных износных испытаний с обработкой масла ультразвуком

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

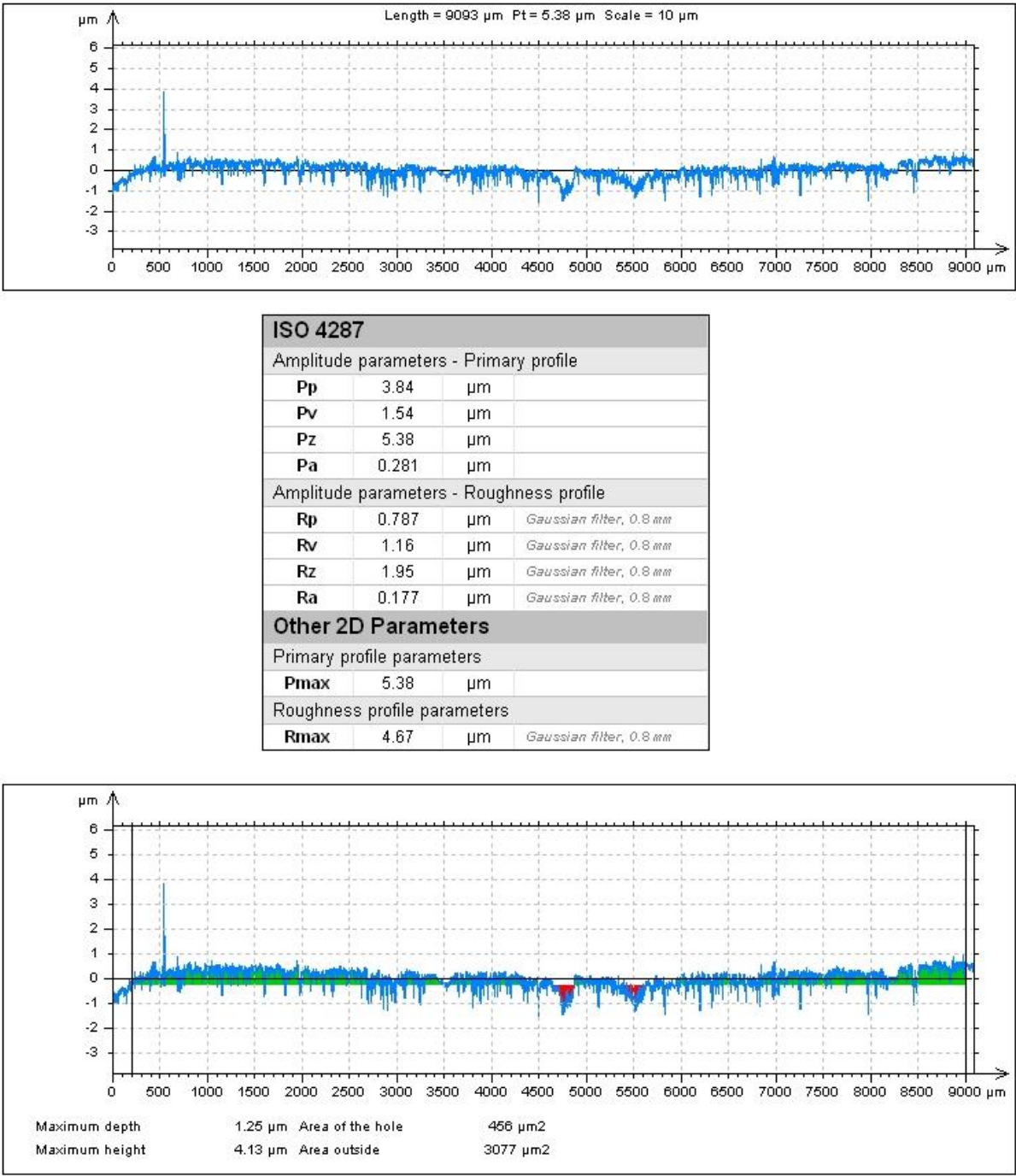


Рисунок В.2 б) - Профилограмма рабочей поверхности ролика, после длительных износных испытаний с обработкой масла ультразвуком

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Таблица В. 1 - Показатели шероховатости рабочих поверхностей при приработочных испытаниях

До испытаний	Образцы для испытаний без обработки ультразвуком		Образцы для испытаний с обработкой ультразвуком 17кГц	
	Колодка		Колодка	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	1,43	14,7	1,5	13,1
	Ролик		Ролик	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	0,422	10,9	1,04	13,2
После испытаний	Колодка		Колодка	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	1,25	15,2	0,327	15,1
	Ролик		Ролик	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	0,4	5,46	0,52	5,95

Таблица В. 2 - Показатели шероховатости рабочих поверхностей при длительных износных испытаниях

До испытаний	Образцы для испытаний без УЗ обработки		Образцы для испытаний с УЗ обработкой (17кГц)	
	Колодка		Колодка	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	1,38	12,4	0,61	9,1
	Ролик		Ролик	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	0,28	3,41	0,181	2,56
После испытаний	Колодка		Колодка	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	1,26	15,6	0,518	5,44
	Ролик		Ролик	
	R _a (μm)	R _{max} (μm)	R _a (μm)	R _{max} (μm)
	0,323	6,06	0,177	4,67

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

"УТВЕРЖДАЮ"



И. о. проректора по научной работе

ФГБОУ ВО РГАТУ

Л.Н. Лазуткина

28 октября 2020 г.

АКТ

**о проведении стендовых испытаний
компрессоров ДВС Д-240 на износостойкость при ультразвуковой
обработке моторного масла**

Мы, нижеподписавшиеся, представители федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева" в лице: заведующего кафедрой "Техническая эксплуатация транспорта", д.т.н., профессора И.А. Успенского, профессора кафедры ТЭТ, д.т.н. А.А. Симдянкина, старшего лаборанта кафедры ТЭТ О.В. Филюшина, прикрепленного к ФГБОУ ВО РГАТУ для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре М.Н. Слюсарева, заведующего кафедры "Технология металлов и ремонта машин", д.т.н. доцента Г.К. Рембаловича, профессора кафедры ТМ и РМ, д.т.н. М.Ю. Костенко составили настоящий акт в том, что в период с "02" сентября 2020 г. по "28" октября 2020 г. в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева" были проведены стендовые испытания на износостойкость компрессоров А29 00.001 ДВС Д-240

Цель испытаний — оценка изменения износостойкости цилиндропоршневой группы компрессора А29.00.001 при периодической

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г

обработке моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком с частотой 43 кГц и мощностью сигнала 50 Вт.

Испытания проводились на стенде, разработанном и изготовленном в соответствии с планом третьего года прикрепления Слюсарева М.Н. к кафедре "Техническая эксплуатация транспорта" для подготовки диссертационной работы.

Метод испытаний – одновременное функционирование двух компрессоров, от общего привода (электромотора с редуктором). В картере одного из компрессоров производилась периодическая автоматизированная ультразвуковая обработка масла. Источники ультразвука: настраиваемый ультразвуковой генератор (УЗГ) и дисковый пьезоизлучатель, прикрепленный снаружи к днищу масляного картера.

Необходимый для ускоренных испытаний форсированный режим работы компрессоров на стенде обеспечен тем, что оба компрессора (в отличие от работы в пневмосистеме реального трактора) постоянно подключены к шестерням приводного вала.

Методика испытаний разработана на основе руководящих документов: ГОСТ 23.205-79; ГОСТ 7057-2001; ГОСТ Р 54783-2011; Руководство РД 50-424-83

Общее время работы компрессоров в составе стенда при проведении испытаний – 256 часов (с перерывами на остановку). УЗГ настраивался на время работы излучателя – 10 минут и время паузы между автоматическими включениями - 190 минут.

До и после проведения испытаний оба компрессора разбирались, снимались, промывались и просушивались поршневые кольца (верхнее и нижнее компрессионные и маслосъемное). Кольца взвешивались на аналитических весах фирмы «Sartorius» (Германия), с точностью измерения 0,00001 г в трехкратной повторности. Значения массы колец записывались в таблицу. Для каждого кольца записывались в таблицу

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г

вычисленные: среднеарифметическое значение массы, среднее квадратическое отклонение массы (σ), коэффициент вариации (V) и интегральный износ (Δ).

Результаты испытаний компрессоров приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 - Результаты испытаний компрессора без УЗ обработки масла

Без УЗ обработки масла	№ замера	Масса поршневых колец компрессора, г		
		Верхнее компрес- сионное	Нижнее компрес- сионное	Масло- съемное
до испытаний	1	8,60787	8,55197	13,55944
	2	8,61421	8,55364	13,56092
	3	8,61256	8,54984	13,56201
Среднее арифметическое, г		8,61154	8,55182	13,56079
Среднее квадратическое отклонение (σ), г		0,00329	0,00191	0,00129
Коэффициент вариации (V) %		0,039	0,022	0,009
после испытаний	1	8,52838	8,47961	13,44004
	2	8,53178	8,48261	13,43745
	3	8,53006	8,48528	13,44287
Среднее арифметическое, г		8,53007	8,48250	13,44012
Среднее квадратическое отклонение (σ), г		0,00170	0,00284	0,00271
Коэффициент вариации (V)%		0,019	0,033	0,020
Интегральный износ (Δ), г		0,08147	0,06932	0,12167

Таблица 2 - Результаты испытаний компрессора с УЗ обработкой масла

С УЗ обработкой масла	№ замера	Масса поршневых колец компрессора, г		
		Верхнее компрес- сионное	Нижнее компрес- сионное	Масло- съемное
до испытаний	1	8,49637	8,56909	13,49156
	2	8,50705	8,56141	13,49318
	3	8,50648	8,56282	13,50038
Среднее арифметическое, г		8,50330	8,56444	13,49504
Среднее квадратическое отклонение (σ), г		0,00601	0,00409	0,00294
Коэффициент вариации (V) %		0,071	0,048	0,022
после испытаний	1	8,44392	8,51474	13,40510
	2	8,44303	8,51986	13,41543
	3	8,45432	8,50899	13,41127
Среднее арифметическое г		8,44709	8,51453	13,41057
Среднее квадратическое отклонение (σ), г		0,00627	0,00543	0,00520
Коэффициент вариации (V)%		0,074	0,063	0,039
Интегральный износ (Δ), г		0,05621	0,04991	0,08447

ОКОНЧАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г

В результате испытаний установлено:

- при обработке моторного масла ультразвуком с частотой 43 кГц и мощностью 50 Вт, интегральный износ верхнего компрессионного кольца снизился на 31%, нижнего компрессионного кольца – на 28%, а маслосъемного кольца – на 30%. В среднем износ деталей компрессора снизился на 29,7 %. Соответственно долговечность компрессора (ресурс безремонтной службы) повысилась на 29,7 % .

Исполнители:

Заведующий кафедрой
технической эксплуатации транспорта,
д.т.н., профессор



И.А. Успенский

Профессор кафедры
технической эксплуатации транспорта, д.т.н.

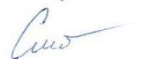


А.А. Симдянкин

Старший лаборант кафедры
технической эксплуатации транспорта



О.В. Филюшин



М.Н. Слюсарев

Заведующий кафедрой
технологии металлов и ремонта машин ,
д.т.н., доцент



Г.К. Рембалович

Профессор кафедры
технологии металлов и ремонта машин, д.т.н.



М.Ю. Костенко