

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Симдянкин Аркадий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Арженовский Алексей Григорьевич**, доктор технических наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде (Ростовская область, РФ), декан Инженерно-технологического факультета
Уханов Денис Александрович, доктор технических наук, профессор, ФАУ "25 ГосНИИ Химмотологии Минобороны России", старший научный сотрудник

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К. А. Тимирязева)

Защита диссертации состоится «28» сентября 2021 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.057.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: www.rgatu.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



Юхин И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 темы. 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 2016-2020 гг. 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 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 сохранения 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.

Степень достоверности результатов проведенных 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" (Белоруссия, Гомель, 25-28 июня 2019 г.), 2^й IAA/AAS Международной конференции по космическим структурам и материалам. (Москва, 25-27 июня 2019 г.), Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта РГАТУ "Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники" (Рязань, 12 октября 2020 г.), 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 дипломом Федеральной службы РФ по интеллектуальной собственности в номинации "100 лучших изобретений России за 2019 г. и первое полугодие 2020 г."

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.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, раскрыта научная и практическая значимость работы, изложены основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе – «Состояние вопроса, цель и задачи исследований» рассмотрены особенности использования дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) мобильной сельхозтехники, проведен анализ существующих конструкторских, технологических и эксплуатационных методов снижения износа деталей и узлов ДВС. Рассмотрены требования, предъявляемые к современным моторным маслам, а также способы и устройства для снижения износа узлов трения путем модификации смазочных масел. Особое внимание уделено существующим методам и устройствам энергетического воздействия (электромагнитного, радиационного, лазерного, а также ультразвукового) на смазочные масла для снижения износа смазываемых узлов. Отмечены достоинства и недостатки рассмотренных устройств. На основании проведенного анализа и в соответствии с поставленной в работе целью сформулированы 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.

Во второй главе – «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» рассмотрены физические основы кавитации, приведена качественная модель разрыва сплошности жидкости и образования парогазовых пузырьков при акустической кавитации.

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. На основании анализа предложена качественная модель разрыва сплошности жидкости при воздействии на нее ультразвуковых колебаний на основе выстраивания неразрывных бесконечных «нитей» молекул и встраивания между ними связывающих их «пружин». При этом расстояние между слоями можно интерпретировать как плотность, а жесткость пружин – вязкость (динамическая или кинематическая, которые характеризуют деформацию чистого сдвига). Были введены следующие допущения: слои могут растягиваться, но не разрываться, а пружины могут и растягиваться, и разрываться.

Рассматривая возмущение от источника ультразвуковых колебаний и принимая во внимание инерциальность слоев жидкости, можно выделить несколько характерных фаз возмущений (прогибов) слоев (см. рис.1). Предположим, что волна возмущения представлена гармоническим колебанием, при этом условно можно выделить шесть фаз – три в зоне сжатия, три – растяжения.

В первой фазе возмущение передается от источника колебаний на первый слой молекул, вызывая его отклонение от исходного положения в сторону, противоположную расположению источника возмущения. Передача возмущения от первого слоя к следующему (вышележащему) осуществляется с временной задержкой, пропорциональной расстоянию между слоями (плотности), жесткости пружин (вязкости) и мощности источника возмущений (колебаний). *Во второй фазе* уже возможен разрыв сплошности жидкости в пристеночной области. *В третьей фазе*, несмотря на падение амплитуды колебаний, инерционность движения слоев жидкости поддерживает процесс передачи возмущений от слоя к слою – по направлению от источника

колебаний. *Четвертая фаза* 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.

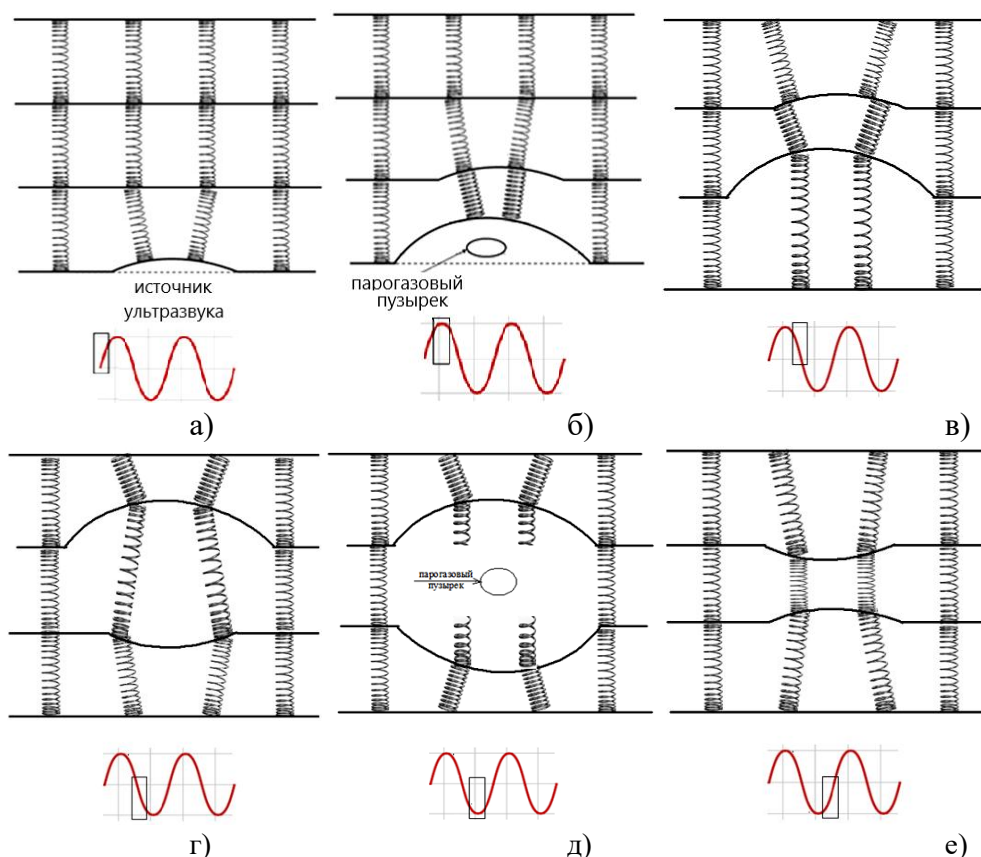


Рисунок 1 – Фазы процесса образования кавитационного пузырька

В пятой фазе при достижении разности фаз двух ближайших слоев жидкости порядка 180° происходит разрыв ее сплошности, и образуется парогазовый пузырек. В шестой фазе взаимно противоположные перемещения соседних слоев компенсируются за счет восстановления связей (пружин). Далее фазы процесса повторяются.

Формирование аналогичных связей возможно, в частности, в моторных маслах ЛУКОЙЛ СТАНДАРТ SAE 10W-40 (минеральное), Shell Helix HX7 10W-40 (полусинтетическое) и ZIC X7 Diesel 10W-40 (синтетическое).

Характеристики плотности (ρ) и кинематической вязкости (ν) для этих масел при температуре 100°C приведены на рис. 2.

Основные положения предложенной качественной модели влияния плотности и вязкости жидкости на разрыв ее сплошности при акустической кавитации были экспериментально подтверждены в данной работе.

Известно, что уравнение, описывающее интенсивность изнашивания при упругом контакте приработанных поверхностей (износ в этом случае стационарный), может быть представлено как:

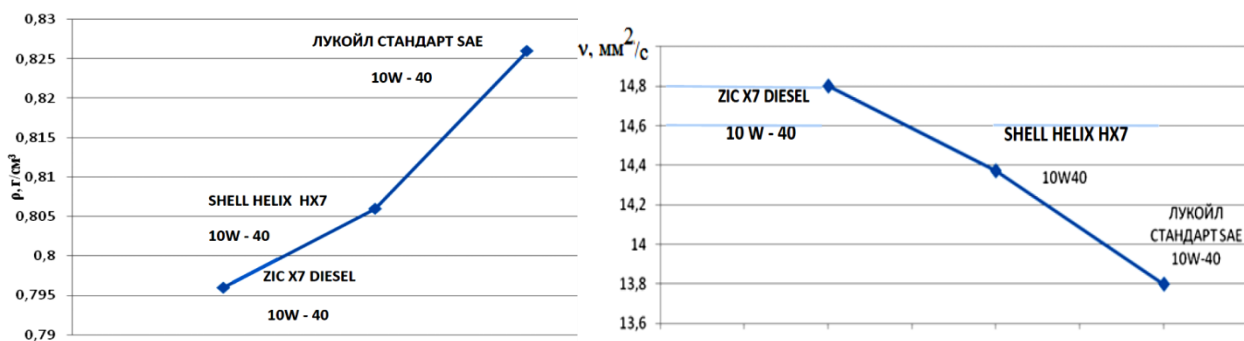


Рисунок 2 – Характеристики плотности и кинематической вязкости масел

$$l_{h_1} = C_1 \cdot P_a \cdot \theta \cdot \left(\frac{\tau_0 \cdot \theta}{\alpha_y} \right)^{\frac{t_y}{2}} \cdot \left(\frac{K_y \cdot f_{min}}{\sigma_0 \theta} \right)^{t_y}, \quad (1)$$

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 (1) позволяет выявить круг внешних и внутренних причин, влияющих на износ материала. К первым относятся совокупность оперируемых в рамках эксперимента параметров, а ко вторым - физико-механические свойства материалов, температура на фрикционном контакте, коэффициент трения и другие факторы. Исходя из вышеизложенного, уравнение (1) может быть представлено тождеством:

$$\frac{l_{h_1}}{P_a} = \Phi_1(M_1) \quad (2)$$

где $\frac{l_{h_1}}{P_a}$ - 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.

При упругом приработанном контакте трущихся поверхностей и наличии стационарного износа в условиях, когда изменение температуры на контакте 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 целесообразно пользоваться показателем фактора износа Φ .

При обработке синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком с частотами в 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) (табл.1), можно предположить, что изменение фактора износа для синтетического масла будет повторять зависимость σ от F ультразвука (рис.3).

Таблица 1 – Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от частоты ультразвукового сигнала 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

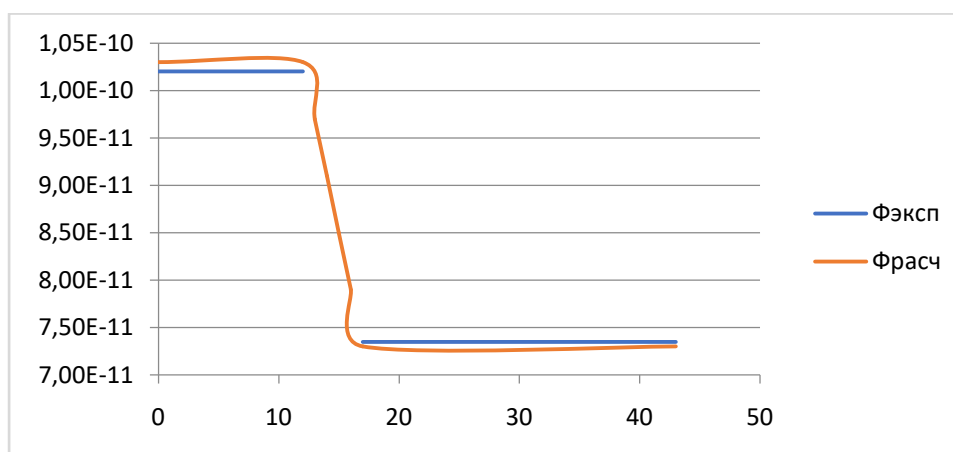


Рисунок 3– График зависимости значений фактора износа (Φ) от частоты ультразвука для синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40

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

$$\Phi = \begin{cases} 1,023 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [0; 12] \\ -0,6 \cdot 10^{-11}F + 1,75 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [12; 17] \\ 0,718 \cdot 10^{-10}; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (3)$$

Эффект снижения износа пар трения при воздействии на смазочное масло ультразвуковыми колебаниями связан со снижением коэффициента его поверхностного натяжения, что позволяет маслу с наименьшими усилиями распределяться по поверхностям пар трения, образуя, тем не менее, пленку достаточной толщины позволяющую повышать несущую способность трущихся поверхностей.

В третьей главе – «Общая и частные методики исследования» была подробно изложена программа и методики проводимых исследований. Методики исследований базируются на российских и межгосударственных стандартах и методических указаниях ГОСТ 23.224-86 и РД 50-662-88.

Представлены методика определения коэффициента поверхностного натяжения моторных масел («отрыв кольца» и «капельный» методы); методика определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения моторных масел от температуры; методики экспериментов по определению влияния параметров ультразвука и времени обработки на изменение температуры и коэффициента поверхностного натяжения масла; методика экспериментальной оценки эффективности кавитационного способа внесения мелкодисперсных добавок в жидкие смазки; методика эксперимента по определению зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке; методика проведения триботехнических испытаний на машине трения при обработке моторного масла ультразвуком.

В четвертой главе – «Результаты экспериментальных исследований» по вышеописанным методикам проведены экспериментальные исследования. В результате эксперимента по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения (σ) от температуры (T^0) для минеральных, полусинтетических и синтетических моторных масел получены линейные зависимости, приведенные в табл. 2.

Таблица 2– Зависимость σ от T^0 для моторных масел

Наименование, класс вязкости и марка масла	Формула для σ мН/м)
Моторное «ZIC X7 Diesel» 10W-40	$\sigma = 40,6 - 0,251T$
Моторное «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40	$\sigma = 41,9 - 0,218T$
Моторное «Lukoil DIESEL OIL» 10W-40	$\sigma = 42,8 - 0,205T$

Полученные зависимости позволяют разграничить величины изменения коэффициента σ , обусловленные воздействием непосредственно ультразвукового облучения и повышением температуры, а также определять интервал температур в зоне контакта для наиболее благоприятного проявления объемно-поверхностных свойств пленочных образований смазки

В результате эксперимента по определению зависимости коэффициента поверхностного натяжения σ от частоты ультразвукового сигнала при мощности ультразвука свыше 25 Вт для минерального, полусинтетического и синтетического моторных масел получены зависимости, представленные формулами (4)-(6):

$$\text{для минерального масла} - \sigma = 37,5; \forall F \in [0; 44] \quad (4)$$

$$\text{для полусинтетического} - \sigma = \begin{cases} 36,8; \forall F \in [0; 12] \\ -0,283F + 39,94; \forall F \in [12; 17] \\ 35,2; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{для синтетического} - \sigma = \begin{cases} 34,3; \forall F \in [0; 12] \\ -0,376F + 38,71; \forall F \in [12; 17] \\ 32,7; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (6)$$

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 синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 дает максимальный эффект снижения σ в диапазоне частот сигнала 17...43 кГц и мощности источника ультразвука не менее 25 Вт.

При проведении экспериментов по подтверждению эффекта сохранности результатов УЗ обработки масла (снижение σ) установлено, что для полусинтетического масла «SHELL Helix HX7 Diesel» 10W-40 результаты сохраняются неизменными в течение 56 часов. Для синтетического масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 результаты полностью сохраняются в течение 72 часов. То есть периодическая ультразвуковая обработка синтетического масла потребуется в 1,3 раза реже, что снижает энергетические затраты.

При этом зависимости были описаны следующими функциями:

$$\text{для полусинтет. масла} - \sigma = \begin{cases} 35,3; \forall F \in [0; 12] \\ 9,264\ln(t) - 6,782; \forall F \in [12; 17] \\ 36,7; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{для синтетического масла} - \sigma = \begin{cases} 32,7; \forall F \in [0; 12] \\ 4,495\ln(t) + 17,3; \forall F \in [12; 17] \\ 34,55; \forall F \in [17; 44] \end{cases} \quad (8)$$

где t - время, ч.

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

Эксперимент по оценке эффективности способа внесения мелкодисперсных добавок, полученных под действием кавитационной эрозии, вызываемой акустической вибрационной кавитацией, в жидкие смазки проводился при облучении синтетического масла, с помещенной в него металлической фольгой, ультразвуком с частотой 43 кГц и мощностью 30 Вт.

Графики зависимости кавитационной потери металла и зависимости концентрации металла в масляной суспензии от времени обработки масла ультразвуком приведены на рис .4.

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

$$\Delta_v = -0,000066 \cdot T^2 + 0,0016 \cdot T - 0,00082, \quad (9)$$

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

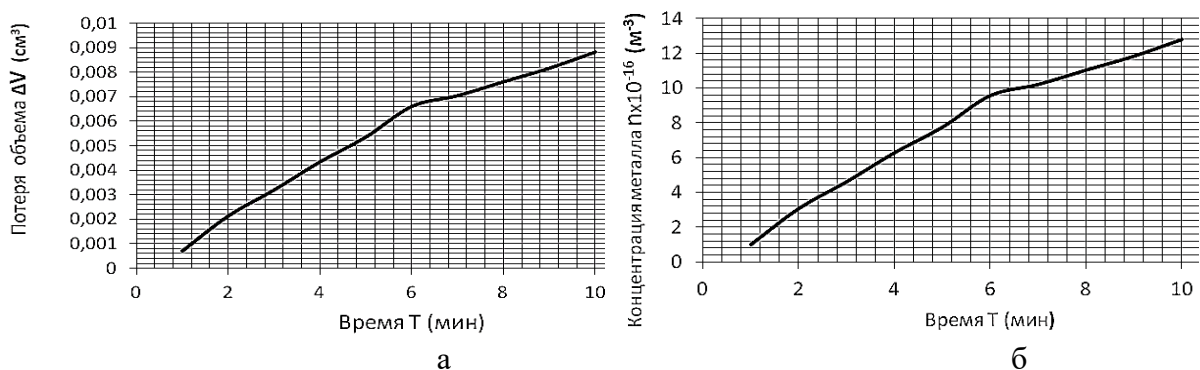


Рисунок 4 –Графики зависимости потери металла Δ_v (а) и концентрации металла в суспензии (б) от времени УЗ обработки масла

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

Анализ результатов эксперимента по определению зависимости кинематической вязкости моторных масел от частоты ультразвука при их ультразвуковой обработке показал, что при ультразвуковой обработке минерального масла вязкость практически не изменялась. При ультразвуковой обработке синтетического масла (12 кГц, $T 23^0$) вязкость уменьшилась не более чем на 2,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (17 кГц; 23^0C), вязкость уменьшилась на 8,2%. При ультразвуковой обработке синтетического масла (17 кГц; 40^0C), вязкость уменьшилась на 7,6%.

При проведении длительных износных испытаний образцов (ролик-колодка) на машине трения СМТ-1М с обработкой синтетического моторного масла «ZIC X7 Diesel» 10W-40 ультразвуком установлено, что уменьшение показателя фактора износа при обработке масла ультразвуком зависит от частоты ультразвука, причем при УЗ обработке с частотой 17...43 кГц показатель фактора износа уменьшился на 28% по сравнению с необработанным ультразвуком смазочным маслом.

Сравнение профилограмм образцов до и после длительных износных испытаний показало 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.

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания при проведении испытаний образцов пар трения на машинах трения проводится по показателю фактора износа:

$$\Phi = \frac{I_{\Sigma}}{P_{on}}, \quad (10)$$

где I_{Σ} –сумма интенсивностей изнашивания элементов пары; $P_{оп}$ – оптимальная нагрузка, МПа.

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. Поэтому при обработке синтетического смазочного масла ультразвуком на частотах более, чем 17 кГц в формулу (9) был введен поправочный коэффициент:

$$\Phi = 0,718 \frac{I_{\Sigma}}{P_{оп}}. \quad (11)$$

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

В пятой главе – «Проверка предложенных решений и оценка их экономической эффективности» было представлено разработанное устройство для периодической ультразвуковой обработки моторного масла, содержащее настраиваемый ультразвуковой генератор (УЗГ) (см. рис. 5) и пьезоэлектрический излучатель.

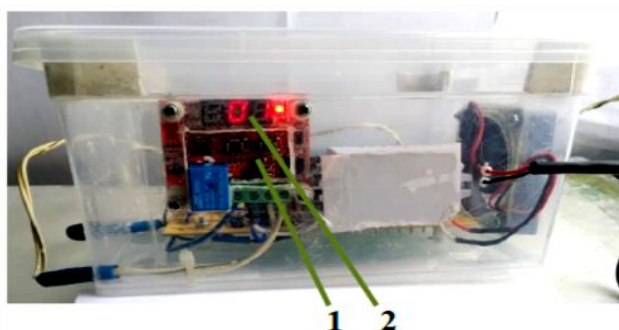
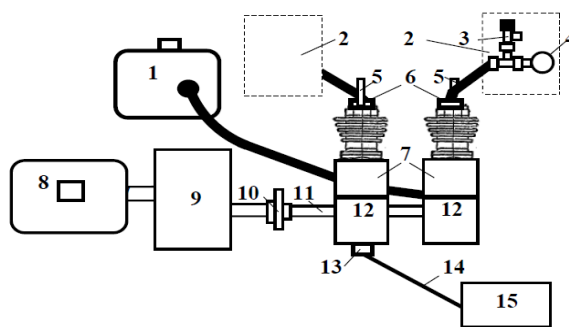


Рисунок 5– Вид спереди:

1 – окно для настроек таймера с кнопками; 2 –индикатор



а)

б)



Рисунок 6– Стенд для износных 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

Устройство предназначено для периодической генерации ультразвуковых колебаний с частотой 43 кГц мощностью 50 Вт и позволяет устанавливать время работы и время паузы между включениями в диапазоне от нескольких секунд до нескольких часов. Устройство было интегрировано в стенд для износных испытаний компрессоров А29.01.000 (рис. 6).

Принцип испытаний – одновременное функционирование двух компрессоров А29.01.000 от общего электропривода, причем в картере одного из компрессоров производится периодическая ультразвуковая обработка моторного масла (время обработки 10 мин, время паузы между включениями – 3,5 ч). После 256 ч испытаний определяется весовой износ деталей обоих компрессоров. Интегральный весовой износ поршневых колец компрессоров приведен на диаграмме (рис. 7).

Среднее квадратичное отклонение результатов взвешивания поршневых колец обоих компрессоров не превышает 0,0065 г; коэффициент квадратичной вариации не превышает 0,1%.

Весовой износ верхнего поршневого кольца при обработке масла снизился на 31%, нижнего поршневого кольца – на 28%, а маслосъемного кольца – на 30%.

Результаты износных испытаний компрессоров на стенде для ускоренных испытаний рассматриваются в качестве результатов физического моделирования реальной эксплуатации цилиндропоршневой группы Д-240 и дают достоверную количественную оценку повышения износостойкости и ресурса безремонтной работы поршневых колец компрессоров при ультразвуковой обработке моторного масла в среднем на 29,7%, что позволяет определить расчетный годовой экономический эффект от внедрения устройства для периодической ультразвуковой обработки.

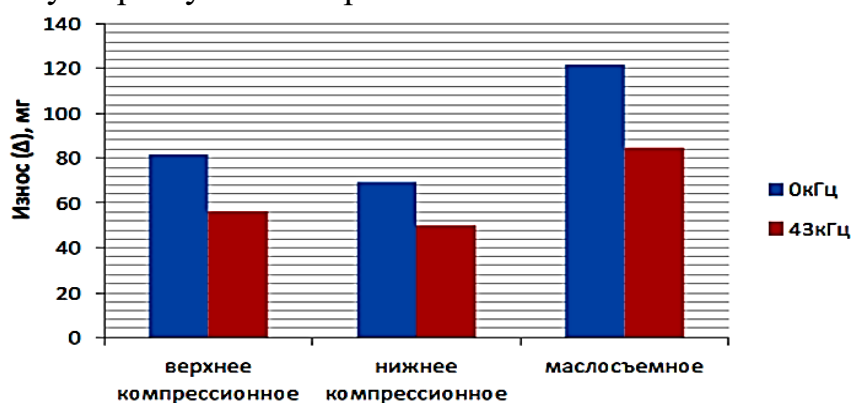


Рисунок 7–Диаграмма весового износа поршневых колец компрессоров: 0 кГц – износ колец без обработки масла ультразвуком; 43 кГц – износ колец при обработке масла ультразвуком с частотой 43 кГц

Расчетный годовой экономический эффект составляет 1096,5 руб.

Заключение

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 сохраняемости 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 17 кГц 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 17 кГц 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 с периодической ультразвуковой обработкой моторного масла.

Положения диссертации и полученные результаты отражены в следующих основных публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России

1. Слюсарев, М.Н. 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.

2. Слюсарев М.Н..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.

Публикация в изданиях из международных глобальных баз Scopus и WoS

3. Слюсарев, М.Н. 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.

4. Slyusarev, M.N. Study of the Influence of the Parametres of Ultrasonic Treament of Motor Oil on the Wear of Friction Paris during the Burn-In Period. /A.A.Simdiانkin and M.N. Slyusarev//Jornal of Friction and Wear, 2019 Vol. 40, No.

Статьи в материалах конференций и других изданиях

5. 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.

6. 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.

7. Слюсарев, М.Н. 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.

8. Слюсарев, М.Н. 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.

9. 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.

10. Слюсарев М.Н. 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.

11. Слюсарев М.Н. 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.

12. Slyusarev, M. 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. WebSite: <http://www.univelt.com>

Патенты РФ

13. Патент на изобретение 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.

*Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 1486 подписано в печать 27.07.2021 г.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А.
Костычева»
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1
Отпечатано в издательстве учебной литературы
и учебно-методических пособий ФГБОУ ВО РГАТУ
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*