

На правах рукописи



ЭЙДЕЛЬ Павел Игоревич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ  
РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЦИКЛОННОГО  
ФИЛЬТРА-СЕПАРАТОРА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ**

Специальность 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир - 2023

Работа выполнена на кафедре «Тепловые двигатели и энергетические установки» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**Драгомиров Сергей Григорьевич**  
профессор кафедры «Тепловые двигатели и  
энергетические установки»  
ФГБОУ ВО «Владимирский  
государственный университет имени  
Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича  
Столетовых»

Официальные оппоненты:

**Галышев Юрий Виталиевич**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор Высшей школы энергетического  
машиностроения ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский политехнический  
университет Петра Великого

**Каминский Роман Валерьевич**  
кандидат технических наук,  
технический директор АО «Турбокомплект»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Нижегородский  
государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева»**

Защита состоится «29» ноября 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д.2.

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

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

Автореферат разослан «27» сентября 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н. доцент



Курмаев Ринат Ханяфиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие автотранспортных поршневых двигателей связано с непрерывным их совершенствованием для повышения надежности, улучшения показателей топливной экономичности и токсичности. При этом предъявляются все более высокие требования к отдельным узлам и агрегатам двигателей, в том числе и к компонентам систем жидкостного охлаждения (СЖО).

Анализ современных СЖО автотранспортных двигателей показывает, что их функциональная, конструктивная и технологическая сложность в последние годы значительно возросла. Это является естественным следствием постоянно растущих требований к повышению эффективности систем охлаждения на фоне непрерывного повышения уровня форсирования этих двигателей.

Внедрение в автомобильном и тракторном двигателестроении наддува с промежуточным охлаждением воздуха (типа «воздух/жидкость»), термостатов с электронным управлением, жидкостных насосов с электроприводом, высокоэффективных теплообменников (радиаторов) и др., а также повышение требований к надежности и эффективности систем охлаждения приводит к необходимости обеспечения высокой чистоты охлаждающей жидкости (ОЖ) в процессе эксплуатации автомобильных и тракторных двигателей.

Данные эксплуатации автомобильной и тракторной техники показывают, что от 25 до 40% неисправностей и отказов двигателей приходится на их СЖО, причем возникающие проблемы в системах охлаждения при эксплуатации автомобильных и тракторных двигателей в значительной степени обусловлены наличием ОЖ загрязнений различной природы.

Очистка (фильтрация) ОЖ обеспечивает удаление из неё механических загрязнений, что уменьшает изнашивание и коррозию деталей, предотвращает отложения на стенке каналов и способствует эффективной передаче тепла от нагретых поверхностей к жидкости. При этом повышается долговечность крыльчаток и уплотнений жидкостного насоса, термостата, радиатора и других элементов СЖО, снижается риск перегрева двигателя и полного выхода его из строя. Очистка ОЖ является перспективным направлением совершенствования систем охлаждения автомобильных и тракторных двигателей.

За рубежом с 60-х годов прошлого века применяются фильтры охлаждающей жидкости (ФОЖ) на двигателях грузовых автомобилей и магистральных тягачей, промышленных и сельскохозяйственных тракторов, лесотехнических машин и др. Ведущие двигателестроительные фирмы мира устанавливают на свои двигатели неразборные ФОЖ типа *spin-on*, производимые зарубежными компаниями *Baldwin*, *Fleetguard*, *Donaldson*, *Hengst*, *WIX* и др. В нашей стране подобные ФОЖ до сих пор не разрабатывались и не производились.

В настоящее время, на фоне турбулентности и обострения международной обстановки, наша страна вынуждена принимать меры для обеспечения суверенитета в области промышленных технологий. В автомобильной промышленности сформирован план мероприятий по импортозамещению автокомпонентов в соответствии с Приказом

Министерства промышленности и торговли РФ №2468 от 06.07.2021г. В частности, для всех видов автомобильной техники (легковые автомобили, легкие коммерческие и грузовые автомобили, автобусы) критически важным является импортозамещение зарубежных автокомпонентов, включающих (кроме прочих) фильтры различных типов.

Изложенное указывает на актуальность создания и исследования отечественных устройств для очистки ОЖ и в целом систем охлаждения автотранспортных двигателей. В данной работе представлена разработка и исследование инновационного гидроциклонного фильтра-сепаратора (ГФС) для СЖО автотранспортных двигателей. Данное направление работ по совершенствованию систем охлаждения двигателей соответствует тенденциям развития современного мирового двигателестроения.

**Степень разработанности темы.** Зарубежные разработки в области очистки ОЖ связаны с отсутствием инновационных подходов к решению этой сложной задачи и базируются на традиционных технологиях фильтрации жидкости через пористые материалы (микропористый картон, химические волокна) или металлические сетки, которые нельзя считать перспективными. Это объясняется тем, что в процессе очистки ОЖ фильтрующие элементы подобного типа быстро засоряются и существенно уменьшают количество пропускаемой жидкости, создавая при этом значительное гидравлическое сопротивление. В предельном случае они вообще перестают пропускать ОЖ. В научном плане известны немногочисленные зарубежные статьи по этой тематике, действительно обладающие научной ценностью (*Hudgens R.D., Hercamp R.D., Eaton E.R., Duvnjak E.*). Остальные зарубежные материалы носят неглубокий информационно-описательный, либо рекламно-ознакомительный характер.

В нашей стране научные публикации по этой тематике до последнего времени практически отсутствовали и научно-исследовательские работы не проводились, за исключением нескольких эпизодических исследований, которые не привели к созданию перспективного фильтра ОЖ.

К сожалению, это не свидетельствует об отсутствии проблемы очистки ОЖ, а говорит лишь о ее сложности и нерешенности в современной науке и практике двигателестроения. В связи с этим данную диссертационную работу обоснованно можно считать первой в этой области, позволившей создать и исследовать высокоэффективный инновационный фильтр ОЖ.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является научное обоснование необходимости фильтрации ОЖ и создание на основе исследований технологии и устройств очистки охлаждающей жидкости для повышения технического уровня автотранспортных поршневых двигателей.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ проблем загрязнения и очистки ОЖ и СЖО в целом, оценить степень целесообразности применения фильтров охлаждающей жидкости на автотранспортных поршневых двигателях;

- разработать и изготовить лабораторную установку для исследования автомобильных устройств очистки ОЖ различных конструкций и принципов действия;

- провести комплексные исследования зарубежных образцов фильтров ОЖ;

- создать методики исследования фильтров ОЖ, а также фракционного и химического анализа загрязнений охлаждающей жидкости;

- сформировать комплекс требований к перспективному устройству очистки ОЖ на основе опыта эксплуатации автотранспортной техники;

- создать эффективное устройство очистки ОЖ и провести его лабораторные исследования и эксплуатационные испытания;

- разработать компьютерную модель создаваемого устройства очистки ОЖ и выявить гидродинамическую картину течений жидкости в его проточной части;

- создать методику предварительного гидравлического расчета разрабатываемого устройства очистки ОЖ;

- выявить закономерности количественного и качественного состава загрязнений ОЖ, образующихся в СЖО в реальных условиях эксплуатации;

- оценить необходимую и достаточную тонкость фильтрации (очистки) ОЖ и дать рекомендации по применению устройств очистки ОЖ на автотранспортных двигателях.

**Объекты исследования:** СЖО автотранспортных поршневых двигателей, устройства для очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- на основе анализа процессов производства и эксплуатации автотранспортных двигателей выявлены источники образования и появления загрязнений в СЖО двигателей;

- определен химический и фракционный состав загрязнений, образующихся в СЖО двигателя, выявлены его закономерности;

- предложен модифицированный принцип гидроцикла для очистки ОЖ двигателя;

- создана методика предварительного гидравлического расчета гидроциклонного устройства очистки ОЖ;

- выполнена оценка необходимой и достаточной тонкости фильтрации ОЖ двигателя;

- установлена степень очистки жидкости от загрязнений в зависимости от величины расхода жидкости и размеров твердых частиц загрязнений в перспективном устройстве очистки ОЖ.

### **Теоретическая и практическая ценность полученных результатов**

Основным результатом выполненной работы является создание высокоэффективного инновационного гидроциклона фильтра-сепаратора (зашщщен патентом РФ на изобретение № 2 625 891) для очистки от твердых частиц загрязнений ОЖ поршневых двигателей различного назначения – автомобильных, автобусных, тракторных, сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин, военной и специальной техники и др. Кроме этого:

- разработана и успешно опробована комплексная лабораторная установка, позволяющая исследовать устройства очистки ОЖ различных конструкций и принципов действия;

- созданы опытные образцы ГФС, успешно прошедшие апробацию в условиях эксплуатации автомобильной техники и освоенные в серийном производстве ООО «НТЦ «АвтоСфера» при Владимирском государственном

университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ООО НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ);

- установлены причины загрязнений СЖО автотранспортных двигателей в процессе эксплуатации;

- разработана методика предварительного гидравлического расчета, созданного ГФС;

- предложены и успешно опробованы методики исследования устройств очистки ОЖ, а также подготовки и последующего анализа частиц загрязнений ОЖ на химический и фракционный состав.

Применение созданного гидроциклонного устройства очистки ОЖ позволит повысить технический уровень автотранспортных поршневых двигателей различного назначения.

**Методология и методы исследования.** В процессе выполнения диссертации использованы: апробированные методы моделирования процессов течения жидкости и очистки жидкостей от твердых частиц, методы математической статистики, компьютерное моделирование, инженерный эксперимент, химический и фракционный анализ.

**Положения, выносимые на защиту:**

- разработанный модифицированный принцип гидроциклиона, положенный в основу создания высокоэффективного фильтра-сепаратора для очистки ОЖ двигателя (защищен патентом РФ на изобретение № 2 625 891);

- оценка необходимой и достаточной тонкости фильтрации ОЖ автотранспортного двигателя;

- найденная зависимость степени очистки ОЖ от величины расхода жидкости и размеров твердых частиц загрязнений в созданном ГФС;

- разработанная методика предварительного гидравлического расчета гидроциклонного фильтра-сепаратора;

- выявленные источники образования загрязнений ОЖ и системы охлаждения двигателя в целом;

- разработанные методики исследования устройств очистки (фильтров) ОЖ, а также подготовки и последующего химического и фракционного анализа задержанных гидроциклонным фильтром-сепаратором частиц загрязнений;

- выявленный химический и фракционный состав частиц загрязнений, образующихся в СЖО двигателя.

**Реализация результатов работы.** На основе результатов проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ было создано несколько модификаций ГФС и освоено их серийное производство (ТУ 28.29.12-001-31706395-2018) на базе организованного в 2018г. малого инновационного предприятия - ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ». Ряд образцов ГФС был установлен в 2016-2017 гг. на городские автобусы *MAN* и *Mercedes* в автотранспортном предприятии г. Владимира – ООО «БигАвтоТранс» (группа компаний). Созданные модификации ГФС применяются с 2018г. в автотранспортном предприятии г. Владимира – ООО «АДМ» на автобусах Волгабас, ЛиАЗ, *MAN*. В Санкт-Петербургском ГУП «Пассажиравтотранс» партия ГФС установлена в 2021 г. на городские автобусы НЕФАЗ, ЛиАЗ, Волгабас. В АО «Ковровский электромеханический завод» (Владimirская обл.) проводятся эксплуатационные испытания и

подготовительные работы по установке модификации ГФС на серийно выпускаемую тракторную и погрузочную технику. На основании директивных документов Министерства обороны РФ в апреле-мае 2023 г. специалистами «21 НИИИ ВАТ МО РФ» были успешно проведены испытания образцов ГФС, установленных на автомобиль «Буран» и КАМАЗ-4310 в армейских условиях. ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ» серийно производит и поставляет созданные ГФС 4-х модификаций потребителям в разных регионах страны, а также в Беларусь и Казахстан.

**Достоверность результатов** работы подтверждается сопоставлением результатов выполненных теоретических расчетов и экспериментальных исследований при их многократной проверке, устойчивой воспроизводимостью экспериментов при заданных погрешностях измерений, а также результатами реальной эксплуатации созданных гидроциклонных фильтров-сепараторов на автотранспортной технике. В процессе исследований применялась стандартная, поверенная измерительная техника и приборы. При химическом анализе частиц загрязнений использовался рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного анализа *ARL ADVANT'X* (производитель *Thermo Scientific* (США), № 38436-08 в Государственном реестре средств измерений). Для визуального изучения реальных загрязнений СЖО использовался технический управляемый видеоэндоскоп высокого разрешения *jProbe FX* (Япония) и USB-микроскоп «Микрон-500» (Россия).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и форумах:

- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы автомобильного транспорта» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, в 2014 – 2020 гг., г. Владимир;
- Третья Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики», 13-14 февраля 2014 г., г. Санкт-Петербург;
- XIV Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи "НТТМ-2014" 24-27 июня 2014 г., г. Москва, ВДНХ;
- II Экономический форум «Владimirская область – территория динамичного развития», июнь 2014 г., г. Владимир;
- Международная научно-практическая конференция «Разработка и производство двигателей и других агрегатов и систем транспортных средств с применением информационных технологий», июнь 2015 г., г. Протвино МО;
- 6-я Российская научно-практическая конференция «Автобусостроение-2015», октябрь 2015 г., г. Москва, АСМ-Холдинг;
- 7-я Российская конференция по рынку грузового и пассажирского автотранспорта «Коммерческий транспорт 2016», март 2016 г., г. Москва, АСМ-Холдинг;
- IX Международная научно-практическая конференция «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве», 2016 и 2017 гг., г. Протвино МО;
- Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2017», 26 августа 2017 г., г. Кубинка МО;

- Международная научно-техническая конференция 8-е и 9-е Луканинские чтения. «Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса», 2019 и 2021 гг., г. Москва, МГТУ «МАДИ»;
- Петербургский международный автомобильный салон «ПМАС-2021», 8 – 10 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург, КВЦ «Экспофорум»;
- Комиссия Министерства обороны Российской Федерации по инновационным проектам и технологиям, 21 февраля 2023г., г. Кубинка МО;
- Всероссийская научно-теоретическая конференция «Актуальные проблемные вопросы функционирования и направления дальнейшего развития системы автотехнического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации», 24 марта 2023г., 21 НИИИ ВАТ Минобороны РФ, г. Бронницы МО;
- Форум «День передовых технологий» Войск национальной гвардии РФ
- круглый стол «Перспективы развития вооружения, военной и специальной техники войск национальной гвардии РФ», 7-8 июля 2023г., Экспоцентр на Красной Пресне, г. Москва.

**Связь работы с научными и инновационными программами.** Часть диссертационной работы была выполнена в рамках проектов Фонда содействия инновациям УМНИК (2013-2015 г., исполнитель Эйдель П.И.) и СТАРТ-1 (2019-2020 гг., договор №2914ГС1/45450, соисполнитель Эйдель П.И.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в зарубежных журналах, получено 2 патента РФ на изобретения.

**Личный вклад.** Автор непосредственно принял активное участие в создании оригинального ГФС для очистки от твердых частиц загрязнений ОЖ в системах охлаждения различных автотранспортных поршневых двигателей, в разработке лабораторной установки, создании опытных образцов ГФС, а также в проведении всех экспериментальных и теоретических исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка используемых источников, а также приложений. Работа содержит 175 страниц печатного текста без учёта приложений, 19 таблиц, 141 рисунок и 111 наименований списка литературы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко излагается суть решаемой в рамках диссертационной работы проблемы, обосновывается ее актуальность, степень разработанности темы исследования, указываются цель и задачи, отмечаются научная новизна и практическая ценность исследования, обосновывается достоверность результатов работы, даются сведения по ее апробации.

**В первой главе** рассмотрены проблемы и перспективы систем жидкостного охлаждения автотранспортных двигателей. Высокие энергетические, экологические и другие показатели современных автомобильных двигателей были бы недостижимы без эффективных систем жидкостного охлаждения.

Различным аспектам совершенствования систем охлаждения транспортных двигателей посвящены работы Безюкова О.К., Буркова В.В.,

Горина А.В., Жукова В.А., Кухарёнока Г.М., Лукова Н.М., Мануйлова В.С., Носова А.Н., Павлова А.А., Петриченко Р.М., Тарасенко В.Е., Шатрова М.Г., Якубовича А.И., *Hudgens R.D., Hercamp R.D., Eaton E.R., Duvnjak E.* и др.

В настоящее время все усилия разработчиков и производителей автомобильных двигателей направлены на повышение эффективности СЖО. При этом современные СЖО значительно усложнились, по сравнению с системами прошлого века. Развитие автотранспортных двигателей связано с непрерывным их совершенствованием для повышения надежности, улучшения показателей топливной экономичности и токсичности. Предъявляются все более высокие требования к отдельным узлам и агрегатам двигателей, в том числе и к компонентам СЖО, которые заметно усложнились и требуют высокого качества и чистоты ОЖ, а также всей системы охлаждения в целом.

Анализ данных эксплуатации автотранспортной техники показывает, что от 25 до 40 % неисправностей и отказов двигателей приходится на СЖО. Чаще всего неполадки в СЖО появляются уже после 150...200 тыс. км пробега автомобиля. У тракторных двигателей и двигателей грузовиков (а также автобусов), работающих обычно с 70...80% нагрузкой, из-за более тяжелых условий работы неполадки могут возникнуть уже после 500...700 часов эксплуатации.

К основным неисправностям СЖО относятся различные течи, разрушение прокладок и сальников, ошибки в срабатывании термостатов и датчиков, закупоривание проточных каналов радиаторов, блоков и головок цилиндров. В условиях эксплуатации в СЖО и ее элементах протекают процессы кавитационной эрозии и химической коррозии, появляются отложения на теплопередающих поверхностях (накипь), образуются продукты разложения и старения антифризов. Все это приводит к ухудшению передачи тепла от нагретых деталей двигателя в СЖО, что может вызвать его перегрев и снижение энергетических показателей, а также значительно повышает риск выхода двигателя из строя. Все указанные неисправности, возникающие в СЖО, неизбежно ведут к изменениям в работе двигателя, ухудшению его рабочих характеристик вплоть до его полного выхода из строя.

Зарубежные исследования СЖО автотранспортных двигателей показали, что только около 30% их них имеют относительно чистую СЖО, остальные характеризуются средней и высокой загрязненностью.

Все указанные проблемы СЖО при эксплуатации автотранспортных двигателей в значительной степени обусловлены наличием в ОЖ загрязнений различной природы, источники которых могут быть классифицированы следующим образом (таблица 1).

Таблица 1 – Источники загрязнений СЖО

Производственно-технологические	Источники загрязнений СЖО	
	образующиеся внутри СЖО	поступающие в СЖО извне
1. Формовочный песок	1.Продукты кавитационной эрозии	1.Песок
2. Металлическая стружка и опилки	2. Продукты химической коррозии	2. Частицы герметиков
3. Окалина	3.Накипь и отложения	3.Фрагменты прокладок
4. Остатки смазочно-охлаждающей жидкости	4.Продукты разложения антифриза	4.Прочие загрязнения

Решением проблемы загрязнения СЖО автотранспортных двигателей может быть установка высокоэффективных фильтров охлаждающей жидкости. В связи с этим актуальной задачей для современного двигателестроения является создание полнопоточного, высокоэффективного, простого и недорогого фильтра ОЖ для повышения технического уровня СЖО.

В России разработки в области ФОЖ на сегодняшний день **полностью отсутствуют**, хотя условия работы автотранспорта довольно тяжелые (из-за невысокой культуры эксплуатации и низкого качества антифризов на рынке).

Очистка ОЖ является перспективным направлением в совершенствовании СЖО поршневых двигателей и позволит обеспечить повышение технического уровня автотранспортных двигателей.

**Во второй главе** дана оценка необходимой и достаточной тонкости очистки ОЖ, приведено обоснование основных требований к перспективному ГФС, выполнен анализ существующих принципов и конструкций для очистки жидкостей и на его основе обоснован принцип действия и описана конструкция создаваемого устройства.

В настоящее время выпускаемые за рубежом фильтры для СЖО двигателей имеют различную номинальную тонкость фильтрации. Так, фирма *WIX* (США) установила для своих фильтров ОЖ с бумажным фильтрующим элементом тонкость фильтрации 27 мкм. Концерн *Parker Hannifin Corp.* для аналогичных фильтров обеспечивает тонкость фильтрации 30 мкм, а компании *Donaldson* и *Fleetguard* (США) – 40 мкм при эффективности фильтрации 95%. Сетчатый фильтр фирмы *Valeo* обеспечивает фильтрацию частиц  $\geq 300$  мкм.

Обобщая различные источники информации по выбору тонкости фильтрации жидкостей в технических системах и учитывая величины минимальных зазоров в элементах СЖО двигателей (минимальные - 500 мкм), по ориентировочным оценкам можно принять в качестве номинальной тонкости фильтрации (95% улавливания частиц) величину  $d_{0,95} = 100$  мкм, т.е. нижний порог фильтров грубой очистки. Таким образом, для очистки ОЖ в системах охлаждения двигателей необходимым и достаточным будет фильтр грубой очистки, улавливающий твердые частицы размером  $\geq 100$  мкм с вероятностью 95%.

Комплексный анализ различных принципов действия и конструкций фильтров (устройств очистки) жидкости показал, что наиболее перспективными для решения этой сложной задачи представляются устройства с использованием принципа гидроциклиона для удаления загрязнений из потока жидкости. Такие устройства отличаются простотой конструкции, небольшими гидравлическими сопротивлениями, достаточно высокой эффективностью, имеют повышенную надежность даже при тяжелых условиях эксплуатации (высокие давления и температуры потоков, наличие агрессивных сред и т.п.). На основе опыта эксплуатации автотранспортной техники сформулирован комплекс требований к перспективному устройству очистки ОЖ. На базе этих требований и была разработана конструкция гидроциклонного фильтра-сепаратора (рисунок 1).

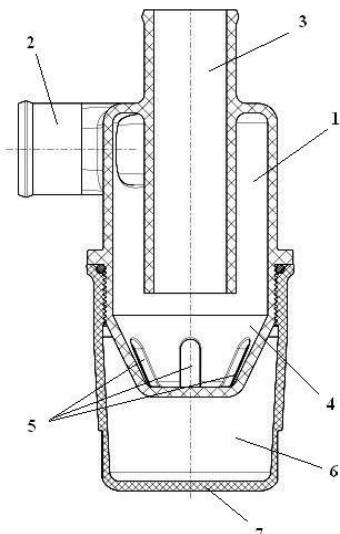


Рисунок 1 - Конструктивная схема разработанного гидроциклонного фильтра-сепаратора (пластиковый вариант): 1 – цилиндрический корпус; 2 и 3 – входной и выходной патрубки; 4 – вихревая камера; 5 – улавливающие отверстия; 6 – грязесборник; 7 – корпус грязесборника

в которой выполнены улавливающие отверстия 5. За счет действия центробежных сил на твердые частицы, имеющие плотность больше, чем плотность жидкости, эти частицы проходят через улавливающие отверстия 5 и поступают из полости вихревой камеры 5 в полость грязесборника 6, где и накапливаются в процессе эксплуатации устройства. Выход потока ОЖ, очищенного от твердых частиц загрязнений, осуществляется через выходной осевой патрубок 3 за счет обратного закрученного центрального тока жидкости внутри цилиндрического корпуса 1. Далее очищенная жидкость поступает в магистраль гидравлической системы охлаждения двигателя, в которую включено устройство. На практике разработанный гидроциклонный фильтр-сепаратор\* может размещаться между двигателем и его радиатором - в разрыве между резиновыми патрубками системы охлаждения.

К конкурентным преимуществам созданного ГФС следует отнести:

- высокоэффективную полнопоточную очистку жидкости, обусловленную применением гидроциклонного принципа работы фильтра-сепаратора;
- отсутствие собственно фильтрующего элемента, что упрощает конструкцию, снижает стоимость и существенно повышает пропускную способность фильтра-сепаратора;

Поток ОЖ, содержащий твердые частицы загрязнений, поступает в цилиндрический корпус 1 устройства через входной тангенциальный патрубок 2 и за счет тангенциального расположения патрубка 2 приобретает вращательное движение внутри цилиндрической камеры 1. Закрученный поток ОЖ в цилиндрическом корпусе 1 имеет различную окружную скорость – высокую на периферии (вблизи стенки) и низкую в центральной зоне. При этом поток движется по винтовой линии к вихревой камере 4. Благодаря действию центробежных сил в закрученном потоке, твердые частицы загрязнений отбрасываются на внутреннюю поверхность стенки цилиндрического корпуса 1 и далее, поступают в вихревую камеру 4. За счет продолжающейся и интенсифицирующейся закрутки потока в вихревой камере 4 происходит отбрасывание твердых частиц загрязнений на внутреннюю стенку вихревой камеры 4,

\* Термин «гидроциклонный фильтр-сепаратор» выбран из тех соображений, что определение «гидроциклонный» указывает на **принцип** его действия, «фильтр» - на **функцию** устройства, а «сепаратор» - на физический **способ**, который обеспечивает удаление частиц загрязнений из потока жидкости.

-гидравлическое сопротивление ГФС не изменяется в процессе его работы и не зависит от степени заполнения грязесборника частицами загрязнений;

- срок службы ГФС примерно равен ресурсу работы двигателя;
- ГФС имеет разборную конструкцию, что позволяет его использовать многократно (с периодической очисткой) без необходимости утилизации;
- вследствие особенностей принципа действия и конструкции, ГФС принципиально не может перекрыть поток жидкости даже при полном заполнении грязесборника частицами загрязнений;
- ГФС обладает конструктивной и технологической простотой, легкостью установки на транспортном средстве (не требует специального посадочного места на блоке двигателя).

Найденное техническое решение может быть успешно применено в СЖО двигателей автомобилей, автобусов, тракторов различного назначения, строительно-дорожных и лесотехнических машин, армейской техники и др.

**В третьей главе** даны результаты компьютерного моделирования работы перспективного устройства очистки ОЖ и представлена гидродинамическая картина течений в проточной части ГФС. На основе этого выполнен выбор его конструктивных параметров и дана оценка эффективности функционирования.

Расчет ГФС производился в программно-вычислительном комплексе *Solid Works Flow Simulation*, который предназначен для газо- и гидродинамического расчетного анализа. Решатель *SWFS* основан на методе конечных объемов, в котором расчетная область разбивается на множество расчетных ячеек. Для каждой ячейки записывается система законов сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме, которая затем преобразуется к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин – плотности, скорости, температуры и др. в центрах расчетных ячеек.

В общем виде законы сохранения можно записать:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \oint_S F ds = \int_V Q dV,$$

где:  $U$  – вектор физических параметров (независимых переменных);  $V$  - объем ячейки;  $F$  – потоки;  $S$  - площадь поверхности ячейки;  $Q$  - массовые силы.

В *SWFS* движение текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды.

Для моделирования турбулентных течений уравнения Навье-Стокса осредняются по Рейнольдсу, т. е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются соответствующими производными по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены — напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания системы уравнений в *SWFS* используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках  $k-e$  модели турбулентности.

При расчетах применялась структурированная конформная прямоугольная сетка (рисунок 2). Так же во всех моделях использовалась локальная адаптация расчётной сетки во входном и выходном отверстиях и в

области улавливающих окон для лучшего разрешения геометрических особенностей проточной части и параметров потока в этих областях.

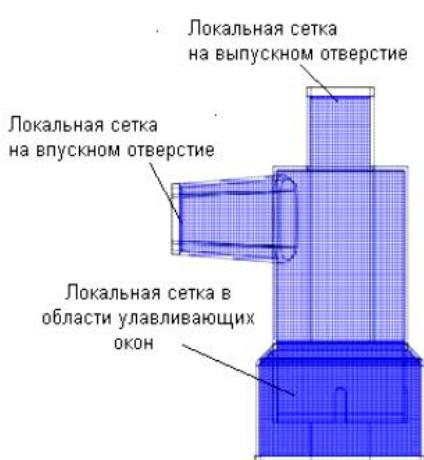


Рисунок 2 - Расчетная сетка

Для обеспечения достоверных результатов расчетов, была проведена серия расчетов на сетках с разным разрешением геометрических особенностей модели и нелинейностей рассчитываемого поля физических параметров, для определения сеточной сходимости решения задачи и получения окончательного решения задачи на оптимальной расчетной сетке. Расчеты проводились на нескольких вариантах базовых сеток, с изменяемыми размерами ячеек от 6 мм до 2 мм.

В результате компьютерного моделирования и предварительного расчета

выявлено, что значения исследуемых параметров, перепада давления и максимальной скорости, стабилизируются, начиная с базовой расчетной сетки с размером ячейки 4 мм, на которой и проводились дальнейшие исследования. Такая подробность расчетной сетки позволяет с достаточной для наших задач точностью разрешить все особенности потока, при незначительном увеличении процессорного времени.

При расчете ГФС в качестве расчетных режимов были приняты расход жидкости в диапазоне 10-70 л/мин на входном отверстии и полное давление жидкости 101325 Па на выходном отверстии. В качестве рабочей жидкости принята вода при температуре 293 К.

Важнейшими показателями, характеризующими работу ГФС, являются его гидравлическое сопротивление (перепад давления  $\Delta P$  между входом и выходом устройства) и улавливающая способность, численно определяемая известным коэффициентом очистки  $\beta$ :

$$\beta = \frac{m_{\eta}}{m_c},$$

где:  $m_c$  - масса тестовых частиц, введенных в гидравлический контур системы в процессе эксперимента;  $m_{\eta}$  - масса задержанных фильтром тестовых частиц.

Все исследования в данной работе направлены на улучшение этих двух показателей для получения работоспособного образца ГФС. При выборе конструктивных параметров макетных и опытных образцов ГФС ориентировались на эмпирические данные, полученные в практике исследования и использования гидроциклонных устройств. За основу любых конструкций ГФС принимались диаметры входных/выходных патрубков, размеры которых должны, безусловно, соответствовать размерам патрубков в СЖО двигателя или отопления салона автотранспортного средства (установка ФОЖ возможна и в контур отопления). При этом в конструкции ГФС варьировались диаметр и высота вихревой камеры, площадь сечения улавливающих отверстий (см. рисунок 1), глубина ввода выходного патрубка в вихревую камеру. На основе выполненных расчетов с последующей экспериментальной проверкой были подобраны определенные геометрические параметры, обеспечивающие работоспособность ГФС с приемлемыми

вышеуказанными показателями. Проведенные расчетные исследования ГФС позволили разработать методику предварительного гидравлического расчета подобных устройств.

Задача оптимизации конструкции ГФС на данном этапе работ не ставилась, однако в перспективе она обязательно будет решаться.

Для достижения приемлемого коэффициента очистки  $\beta$  при минимальном гидравлическом сопротивлении были произведены расчеты опытных образцов ГФС при различных расходах в диапазоне 10...70 л/мин. Расчет улавливания твердых частиц загрязнений моделировался в установившемся потоке ОЖ при расходе 70 л/мин. Результаты расчетов гидравлического сопротивления ГФС представлены на рисунке 3. Погрешность между экспериментом и расчетом не выходит за пределы 4%, что можно считать приемлемым для подобного рода задач.

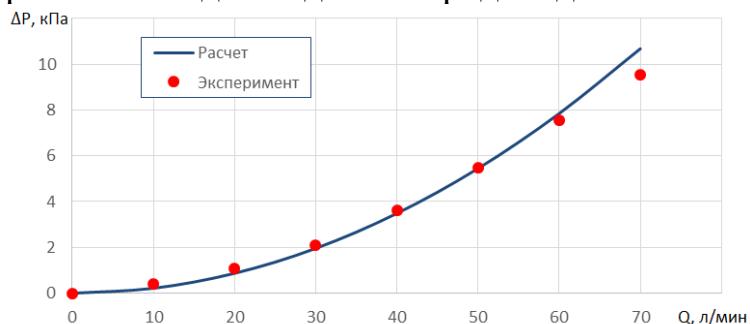


Рисунок 3 - Зависимость перепада статического давления  $\Delta P$  между входом и выходом ГФС от расхода жидкости  $Q$  через него

На рисунках 4-7 представлено распределение скоростей в проточной области ГФС при расходах 20 и 70 л/мин, а на рисунках 8-11 расчетное распределение давлений и линий тока (траекторий движения частиц потока) в проточной области ГФС при расходах 20 и 70 л/мин.

Характер течения, показанный на рисунках 8-11, свидетельствует о том, что даже при сравнительно небольших расходах поток внутри ГФС интенсивно закручивается, что обуславливает постоянную сепарацию твердых частиц в широком рабочем диапазоне ГФС. Это свойство постоянной сепарации твердых частиц из жидкости востребовано в условиях реальной работы двигателей при частых сменах скоростных режимов.

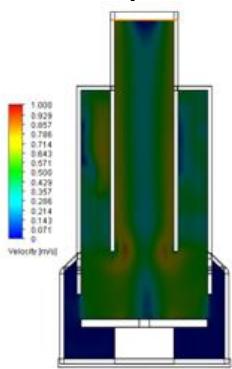


Рисунок 4 - Картина распределения абсолютных скоростей в продольном сечении потока ГФС при расходе 20 л/мин

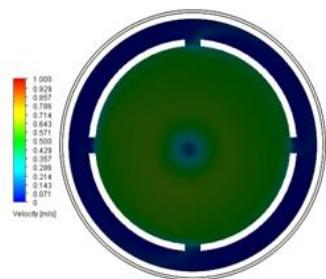


Рисунок 5 - Картина распределения абсолютных скоростей в поперечном сечении потока ГФС при расходе 20 л/мин

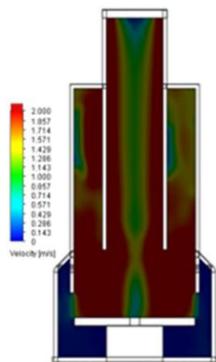


Рисунок 6 - Картина распределения абсолютных скоростей в продольном сечении потока ГФС при расходе 70 л/мин

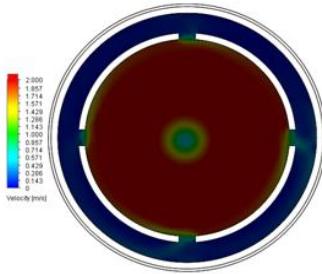


Рисунок 7 - Картина распределения абсолютных скоростей в поперечном сечении потока ГФС при расходе 70 л/мин

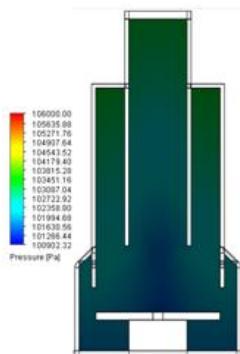


Рисунок 8 - Картина распределения полных давлений в продольном сечении потока жидкости при расходе 20 л/мин

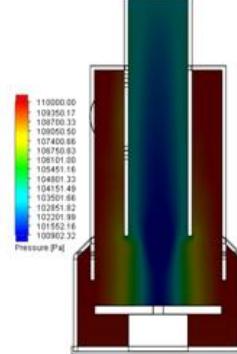


Рисунок 9 - Картина распределения полных давлений в продольном сечении потока жидкости при расходе 70 л/мин

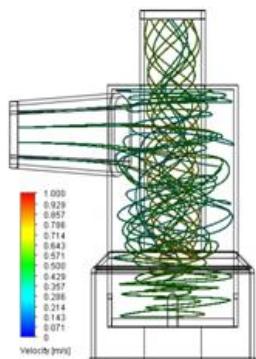


Рисунок 10 - Картина течения (с заливкой по модулю скорости) в продольном сечении потока жидкости при расходе 20 л/мин

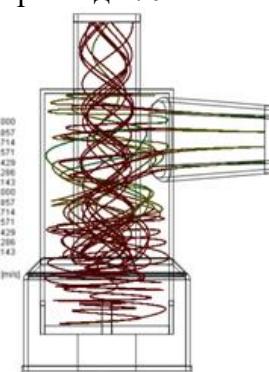


Рисунок 11 - Картина течения (с заливкой по модулю скорости) в продольном сечении потока жидкости при расходе 70 л/мин

На основе компьютерной модели ГФС было выполнено расчетное исследование улавливающей способности разработанного устройства на режиме 70 л/мин. с использованием тестовых частиц размерами 110, 250, 450 мкм. Сравнение полученных результатов (расчет/эксперимент) по изменению коэффициента очистки  $\beta$  представлено на рисунке 12. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает хорошую сходимость для тестовых частиц размерами 250 и 450 мкм (не превышающую 3%). Для частиц с размерами 110 мкм различия между расчетными и экспериментальными

данными очень существенны, что может быть объяснено как погрешностями эксперимента, так и несовершенством расчета для частиц малого размера. Возможно, для корректного расчета движения частиц такого малого размера необходимо значительно сгущать расчетную сетку, что потребует гораздо более серьезных вычислительных ресурсов.

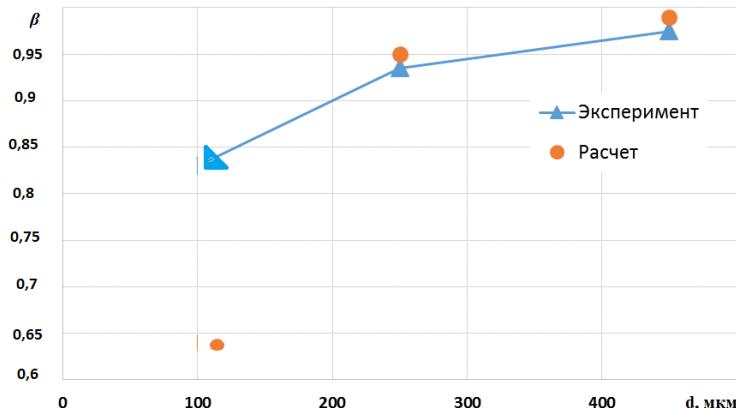


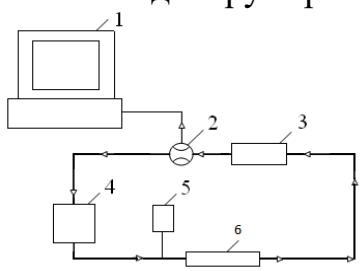
Рисунок 12 - Зависимость коэффициента очистки  $\beta$  от размера тестовых частиц (мкм) при расходе жидкости 70 л/мин

**В четвертой главе** описаны методики и приведены результаты экспериментальных исследований созданных макетных, опытных и серийных образцов ГФС на лабораторном стенде. Кроме этого, одной из задач данного этапа работы являлось исследование зарубежных образцов ФОЖ.

В процессе

лабораторного

исследования использовалась созданная лабораторная установка (рисунок 13), позволяющая моделировать различные гидравлические режимы работы устройств очистки в составе СЖО (с изменением расходов жидкости в контуре системы). Работа стенда может осуществляться при однократном или многократном проходе тестовых частиц через устройство очистки. Первая схема необходима для экспериментальной проверки результатов расчетов, вторая схема моделирует реальные условия эксплуатации устройства очистки.



а)



б)

Рисунок 13 - Схема (а) и внешний вид (б) лабораторной моделирующей установки для исследования работы устройств очистки: 1 – персональный компьютер; 2 – расходомер; 3 – фильтр ОЖ; 4 – насос; 5 – устройство для ввода тестовых частиц; 6 – прозрачная трубка

Исследования работы устройств очистки (фильтров) различных конструкций проводились путем ввода в поток тестовых частиц корунда определенных размеров. Для этого использовался фракционированный песок компании *Triakor* (ФРГ), применяемый для стоматологических пескоструйных аппаратов, отличающийся малым разбросом размеров частиц. При этом фиксировались массы введенной порции тестовых частиц загрязнений и уловленной фильтром-сепаратором в грязесборнике.

В результате лабораторных исследований была получена зависимость, оценивающая эффективность образцов ГФС различных конструкций. На

рисунке 14 приведена типичная зависимость коэффициента очистки  $\beta$  от размера (условного диаметра) тестовых частиц при различных расходах рабочей жидкости для одного из опытных вариантов конструкций ГФС с диаметрами входных/выходных патрубков 38 мм.

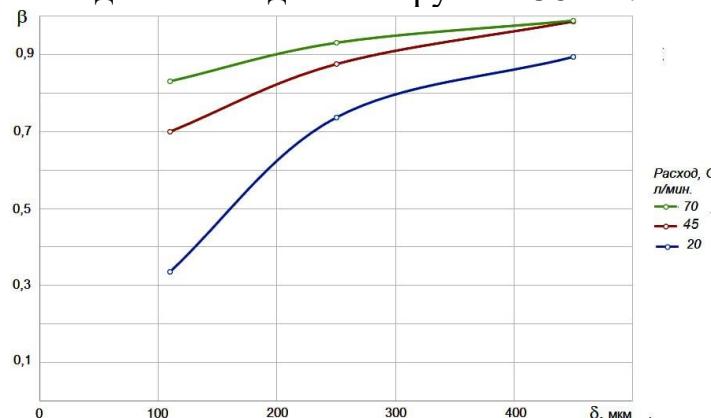


Рисунок 14 -  
Зависимость  
коэффициента  
очистки  $\beta$  от  
размера тестовых  
частиц при  
различных  
расходах для  
опытного образца  
ГФС

В ходе проведенных лабораторных исследований также была определена эффективность серийных образцов гидроциклонных ГФС моделей ФС-38А ( $\varnothing$  патрубков 38 мм) и ФС-20А ( $\varnothing$  патрубков 20 мм), производимых ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ» по ТУ 28.29.12-001-31706395-2018 (таблица 2). Исследования проводились на номинальных расходах жидкости для каждого из этих фильтров-сепараторов при размере тестовых частиц загрязнений  $110 \pm 10$  мкм.

Таблица 2 –Коэффициенты очистки  $\beta$  серийных ГФС моделей ФС-38А и ФС-20А при однократном и многократном проходах тестовых частиц

Вариант ГФС	Номинальный $Q$ , л/мин.	$\beta$ , при режимах тестирования	
		однократный проход частиц	многократный проход частиц
ФС-38А	50	0,35	0,97
ФС-20А	15	0,82	0,97

На рисунке 15 приведены зависимости гидравлического сопротивления 2-х серийных образцов фильтров-сепараторов от величины расхода жидкости.

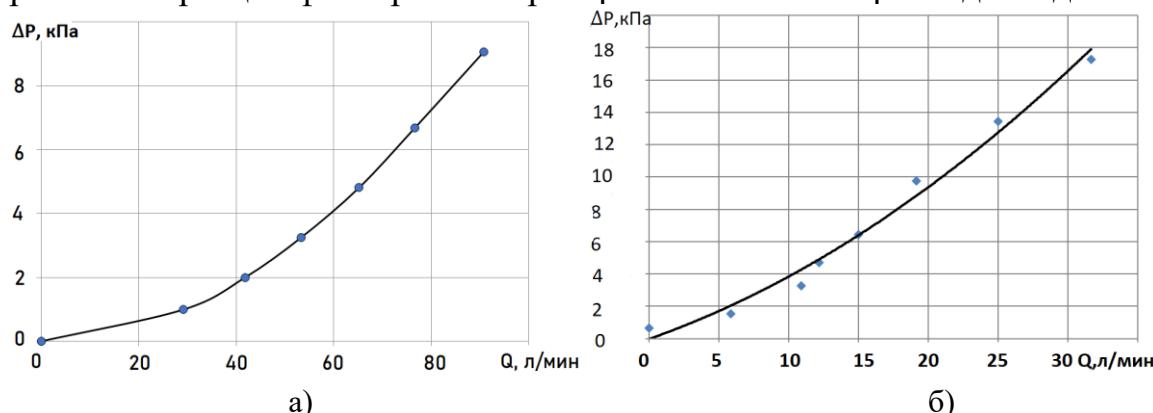


Рисунок 15 - Характеристики гидравлического сопротивления  $\Delta P$  серийных фильтров-сепараторов моделей ФС-38А (а) и ФС-20А (б)

Результаты лабораторных исследований опытных и серийных образцов ГФС позволяют сделать вывод о приемлемых показателях работы вариантов разработанного фильтра как по улавливающей способности (коэффициенту

очистки  $\beta$ ), так и по их гидравлическому сопротивлению.

**В пятой главе** представлены следующие результаты работы:

1. выявление реальной картины загрязнений СЖО в процессе эксплуатации автотранспортных средств (путем визуальной оценки);
2. испытание разработанных опытных/серийных образцов ГФС в условиях эксплуатации и анализ полученных результатов;
3. исследование химического и фракционного состава загрязнений ОЖ, полученных в реальных условиях эксплуатации;
4. анализ гидравлической совместимости разработанного ГФС с СЖО двигателя.

Выявление реальной картины загрязнений СЖО двигателей различной грузовой (автобусной) и строительной техники, находящейся в эксплуатации фирм и предприятий г. Владимир и области, проводилось с использованием современной аппаратуры и специального исследовательского оборудования. В частности, использовался технический управляемый видеоэндоскоп высокого разрешения *jProbeFX* и *USB*-микроскоп «Микрон-500».

В процессе исследования, были обнаружены: значительные образования накипи; продукты химической коррозии и кавитационной эрозии элементов СЖО; фрагменты разрушившихся уплотнительных элементов; продукты разложения антифриза (гели) и отработанных присадок; значительное количество песка, грязи, силиконовых герметиков, масляные и жировые отложения.

Были исследованы частицы загрязнений, задержанные разработанными ГФС в процессе реальной эксплуатации. Загрязнения были получены из опытных/серийных образцов ГФС, установленных в контуры системы отопления салонов городских и междугородних автобусов *MAN*, *Mercedes* и *Setra*, находящихся в эксплуатации у компании ООО «БигАвтоТранс», городских автобусов *Волгабас* (ООО «АДМ») и грузовых автомобилей-тягачей *SCANIA R 420*.

В первоначальном виде все загрязнения представляют собой мазеобразную массу из частиц песка, металлов и др. Собранная масса подвергалась специальной подготовке к фракционному, химическому и визуальному анализам.

Исследование фракционного состава типичной порции твердых частиц загрязнений, полученной из конкретного фильтра-сепаратора ОЖ двигателя автобуса, показало, что более 85% всех загрязнений имеет размер от 50 до 1000 мкм (рисунок 16).

Следует отметить, что при этом твердые частицы с размером 250-450 мкм имеют наибольшую долю (более 45% по массе) среди всех частиц загрязнений различных размеров. Фракция 450-700 мкм составляет около 17% (масс.) среди общей массы загрязнений. Относительное количество загрязнений остальных фракций не превышает 10%.

Очевидно, что наиболее опасными составляющими загрязнений являются частицы железа *Fe* и кремния *Si*, т.к. они обладают абразивными свойствами и могут способствовать удалению тонкой окисной пленки на внутренней поверхности стенок каналов радиаторов охлаждения, приводя их к коррозии и преждевременному разрушению. Распределение частиц *Fe* и *Si* по

фракциям в типичной порции загрязнений, полученной из фильтра-сепаратора ОЖ двигателя автобуса, дано на рисунке 17.

Данные графика на рисунке 17 показывают, что наибольшую долю кремния *Si* содержат фракции загрязнений с размерами до 250 мкм – в этих фракциях содержание *Si* составляет 30-35% (по массе). Далее, по мере укрупнения фракций, относительное количество частиц *Si* снижается примерно до 15-22% в каждой фракции.

По частицам железа *Fe* наблюдается несколько иная картина. Наибольшее относительное содержание частиц *Fe* наблюдается (рисунок 17) во фракции с размерами от 250-450 мкм – около 40% (по массе). Во фракциях 100-250 мкм и 450-700 мкм – примерно около 35% в каждой. В остальных фракциях содержание частиц *Fe* находится в пределах 18-23%.

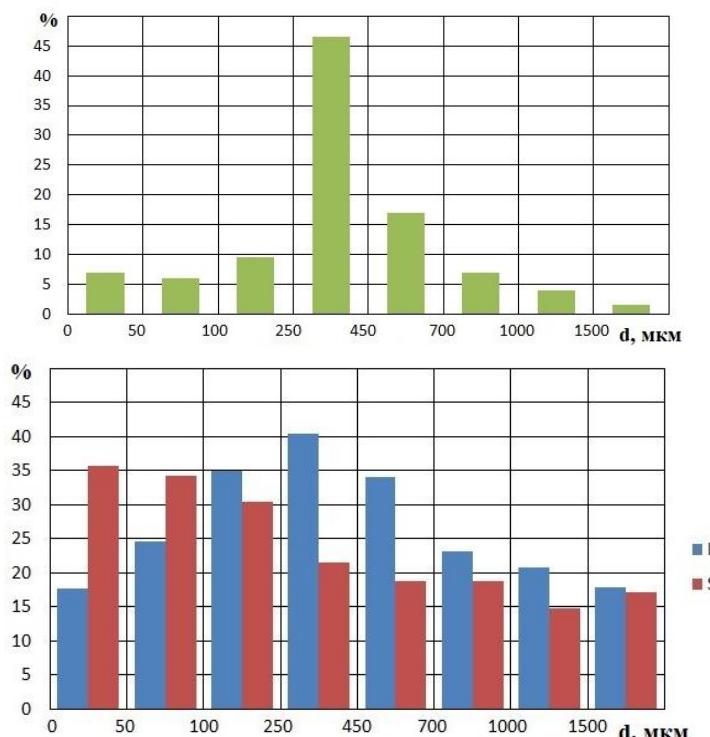


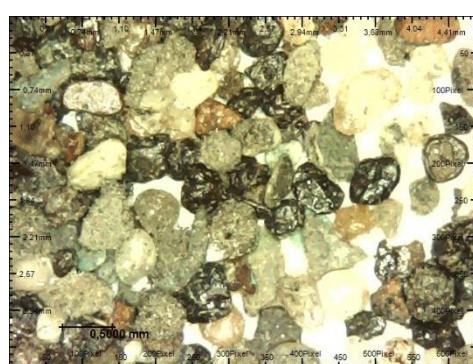
Рисунок 16 -  
Распределение твердых  
частиц реальных  
загрязнений ОЖ по  
фракциям в типичной  
порции загрязнений,  
полученной из ГФС  
(размер фракций дан в  
пределах от 0 до 50 мкм,  
от 50 до 100 мкм и т.д.)

Рисунок 17 - Типичное  
распределение частиц  
железа *Fe* и кремния *Si*  
по фракциям в составе  
твердых частиц  
реальных загрязнений

Визуальный анализ твердых частиц загрязнений с помощью USB-микроскопа «Микрон-500» позволил установить их форму и примерные размеры. Типичные фото частиц загрязнений приведены на рисунке 18.



Размер частиц: 700-1000 мкм Увеличение:130x



Размер частиц: 250-450 мкм Увеличение:130x

Рисунок 18 - Микрофотографии различных фракций (по группам) твердых частиц реальных загрязнений ОЖ, полученных в процессе эксплуатации автобусов

Как показывает анализ приведенных типичных микрофотографий, твердые частицы загрязнений ОЖ автотранспортных двигателей имеют самую разнообразную форму – от округлой до угловатой. В частности, встречается чешуйчатая форма частиц, овальная (округлая) и с острыми гранями. Кроме этого, наблюдаются продолговатые нитеобразные частицы загрязнений в мелких фракциях. Материалом всех этих частиц является кремний, железо, алюминий и др. При этом следует отметить, что округлые частицы (их величина, как правило, меньше 450 мкм) менее опасны для элементов системы охлаждения. Твердые частицы с острыми углами между гранями, напротив, более опасны, т.к. могут вызывать повышенный износ в процессах трения или удалять окисную пленку с алюминиевых деталей, приводя к усилению их коррозии и разрушению. В этом отношении, как уже указывалось, наибольшую опасность представляют частицы железа *Fe* и частицы кремния *Si*, которые обладают значительной твердостью и угловатостью одновременно.

Обобщенные данные по относительному химическому составу твердых частиц загрязнений, содержащихся в ОЖ различных двигателей (грузовых автомобилей, автобусов, комбайнов), приведены в таблице 3.

Следует отметить значительное количество частиц железа *Fe* среди загрязнений – от 13,7 до 47,1%. Особенно много частиц *Fe* во фракциях 450-700 мкм, 250-450 мкм, 100-250 мкм, 50-100 мкм. То есть это довольно крупные частицы с размерами 50-700 мкм. Природа их появления в антифризе – кавитационные и коррозионные разрушения гильз цилиндров двигателей и других деталей из черных металлов.

Обращает на себя внимание значительное количество кремния *Si* (песка) в общей массе загрязнений – от 14,4 до 36,7%. Наличие песка в антифризе может быть объяснено как производственно-технологическими причинами его попадания в рубашку двигателя (при его изготовлении), так и внесением частиц песка в СЖО вследствие невысокой культуры эксплуатации техники.

Таблица 3 - Обобщенные данные по относительному химическому составу твердых частиц загрязнений, содержащихся в антифризе

Размер частиц по группам (мкм)	Доля отдельных химических элементов, % (масс.)								
	Fe	Pb	Si	Sn	Zn	Al	Ca	Cu	Mg
A ( $\geq 1500$ )	15,9- 20,0	0,4- 0,9	14,4- 19,9	6,0- 14,1	8,6- 18,0	7,4- 9,6	2,4- 5,9	5,5- 10,8	1,8- 2,5
B (1000..1500)	20,2- 21,5	0,8- 0,9	10,5- 19,3	9,8- 11,1	7,4- 12,2	3,3- 7,8	2,1- 6,7	5,3- 8,1	0,96- 3,1
C (700...1000)	21,2- 25,4	0,68- 0,7	18,1- 19,4	2,5- 8,7	7,2- 10,6	7,7- 12,8	5,5- 6,2	5,1- 9,1	2,4- 2,9
D (450...700)	29,8- 38,3	0,6- 1,0	17,6- 20,1	1,6- 2,2	5,2- 12,1	7,4- 8,7	5,3- 5,7	4,5- 8,8	2,4- 3,0
E (250...450)	33,8- 47,1	0,7- 0,9	19,1- 24,0	0,9- 1,3	3,4- 11,9	5,7- 6,9	3,4- 4,2	3,3- 7,3	2,0- 2,5

Продолжение таблицы 3

F (100...250)	25,7- 44,2	0,5- 0,65	29,8- 31,1	0,56- 0,8	2,5- 5,9	5,1- 7,7	3,1- 9,2	2,8- 4,5	1,4- 2,7
G (50...100)	16,0- 33,2	0,4- 0,55	31,7- 36,7	0,26- 0,35	2,9- 3,4	7,0- 8,8	8,1- 17,1	2,8- 3,5	2,8- 4,1
H (< 50)	13,7- 21,8	0,2- 0,58	35,2- 36,4	0,22- 0,30	2,9- 3,2	8,4- 9,3	13,2- 19,3	3,2- 3,7	4,0- 4,3

Наличие частиц алюминия *Al* является следствием кавитационной эрозии и химической коррозии деталей двигателя из алюминиевых сплавов. Появление в загрязнениях частиц свинца *Pb* и олова *Sn* объясняется содержанием этих элементов в припое, которым пропаиваются радиаторы двигателя и отопителя салона. Таким же путем может попадать и *Zn* в состав загрязнений. Частицы *Ca* и *Mg* входят в состав накипи, отлагающейся на стенках системы охлаждения двигателя при использовании некачественного антифриза. Также *Ca* и *Mg* часто применяются в многофункциональных присадках в антифризах. Присутствие частиц *Cu* может объясняться ее содержанием как в припое, используемом при сборке радиаторов, так и в других элементах двигателя.

Анализируя состав загрязнений, можно отметить, что наиболее опасными и присутствующими в значительных количествах являются частицы *Fe* и *Si*. То есть, по сути, антифриз представляет собой своеобразный раствор абразива, действующего на внутреннюю поверхность различных радиаторов, сальник насоса, крыльчатку, клапан термостата и др. Это воздействие может быть опасным и приводить к выходу элементов двигателя из строя.

Эксплуатационные испытания разработанных ГФС проводились в автобусном парке (г. Владимир), на городских автобусах зарубежного производства. Через 40...50 тыс. км пробега автобуса (примерно через 3...4 месяца эксплуатации) каждый из испытуемых ГФС демонтировался и вскрывался для удаления загрязнений. В результате оказалось, что за указанное время работы ГФС задерживали от 75 до 130 грамм загрязнений (в сухом виде), представляющих собой мазеобразную массу из частиц песка, металлов, накипи и др. Далее собранная масса подвергалась специальной подготовке к анализу.

Результаты эксплуатационных испытаний по улавливанию загрязнений показаны на рисунке 19. График, полученный за 2,5 года испытаний (май 2014 – ноябрь 2016), показывает, что ГФС довольно эффективно работают, уменьшая количество загрязнений в СЖО в процессе эксплуатации автобуса.

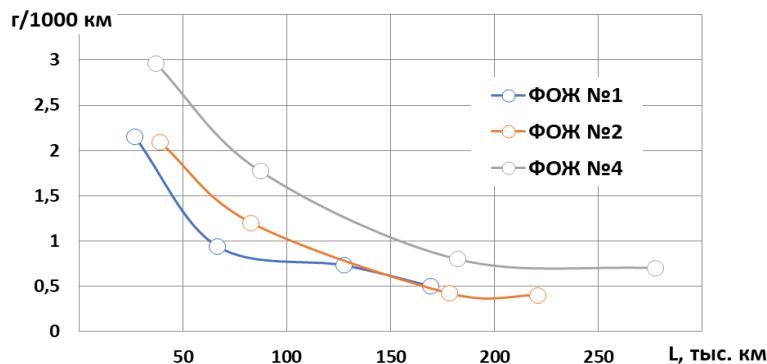


Рисунок 19 - Изменение удельного количества загрязнений, уловленных опытными ГФС в зависимости от величины пробега *L* 3-х городских автобусов

Для определения возможных изменений гидравлических характеристик СЖО двигателя при установке в неё разработанного ГФС, проведено испытание фильтра-сепаратора на моторном стенде с двигателем ВАЗ-2106 на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Испытания показали, что гидравлические характеристики системы, естественно, изменяются с подключением ГФС. Так, расход ОЖ в системе несколько снижается, но это снижение не превышает 12% (рисунок 20), что вполне допустимо, т.к. обычно насос подбирается для системы охлаждения с запасом по производительности. Вопрос гидравлической совместимости ГФС и системы охлаждения двигателя требует специального изучения, поскольку параметры СЖО каждой модели двигателя индивидуальны. В каждом конкретном случае необходимо отдельно рассматривать вопрос по месту включения ГФС в систему охлаждения двигателя автотранспортного средства.

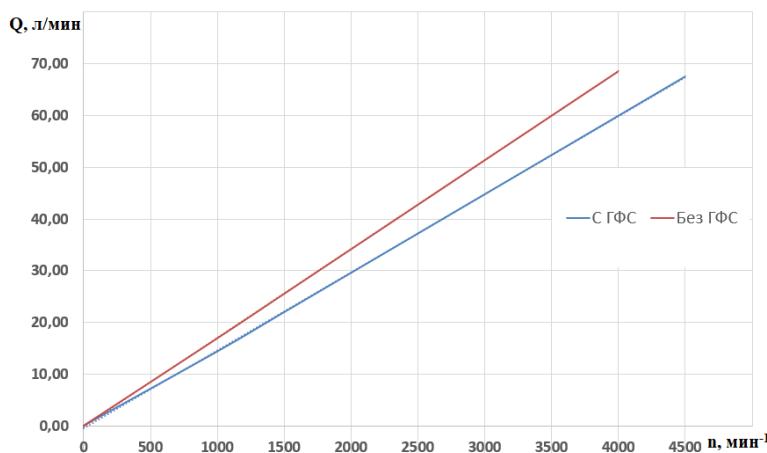


Рисунок 20 - Зависимость расхода ОЖ  $Q$  от частоты вращения коленчатого вала  $n$  двигателя ВАЗ-2106: красная линия – стандартная СЖО; синяя линия – СЖО с включением ГФС

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных исследований и опытно-конструкторских работ создан инновационный высокоэффективный гидроциклонный фильтра-сепаратор охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей, конструкция которого защищена патентом РФ. Серийное производство этого фильтра-сепаратора освоено (ТУ 28.29.12-001-31706395-2018) в ООО «НТЦ «АвтоСфера» при Владимирском государственном университете им. А.Г. и Н.Г. Столетовых». Модификации фильтра-сепаратора поставляются различным потребителям в разных регионах страны, а также в Беларусь и Казахстан.

2. На основе научных и практических данных доказаны актуальность и необходимость применения очистки охлаждающей жидкости на современных автотранспортных поршневых двигателях, имеющих высокоэффективные системы охлаждения, постоянно усложняющиеся в структурном и конструктивном аспектах, что требует более высокой чистоты охлаждающей жидкости. Обобщенной причиной появления загрязнений различной природы в системах охлаждения является физико-химическое взаимодействие охлаждающей жидкости (антифриза) с разными элементами и разнородными

материалами системы охлаждения. Использование абсолютно чистой охлаждающей жидкости в системах охлаждения автомобильных и тракторных двигателей практически нереально, так как всегда будут существовать эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений.

**3.** Разработана, изготовлена и успешно опробована комплексная лабораторная установка для исследования автомобильных устройств очистки (фильтров) охлаждающей жидкости различных конструкций и принципов действия. Созданы и успешно прошли практическую проверку методики исследования фильтров ОЖ, а также фракционного и химического анализа загрязнений охлаждающей жидкости.

**4.** Проведенный конструктивный анализ и комплекс исследований зарубежных образцов фильтров охлаждающей жидкости показал, что все они построены по традиционным принципам очистки жидкостей с использованием фильтрующих элементов (бумажных, сетчатых и т.п.) и не отвечают предъявляемым требованиям современной автомобильной техники. Такие фильтры обладают целым рядом существенных недостатков и в целом их нельзя считать перспективными для автотранспортных двигателей.

**5.** На основе опыта эксплуатации автомобильной техники сформирован комплекс требований к перспективному устройству очистки охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей, включающий в себя функциональные требования и требования к его эффективности.

**6.** Создана компьютерная модель ГФС, позволившая выявить гидродинамическую картину течения жидкости в его проточной части и предварительно оценить его улавливающую способность и гидравлическое сопротивление в зависимости от конструктивных параметров. Разработана методика предварительного гидравлического расчета ГФС.

**7.** Выявлен фракционный и химический состав твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости, образующихся в системах охлаждения автотранспортных двигателей в реальных условиях эксплуатации. Фракционный анализ типичной порции твердых частиц загрязнений, полученной из конкретного фильтра-сепаратора ОЖ двигателя автобуса, показал, что более 85% всех загрязнений имеет размер от 50 до 1000 мкм. При этом твердые частицы с размером 250-450 мкм имеют наибольшую долю (более 45% по массе) среди всех частиц загрязнений различных размеров. Фракция 450-700 мкм составляет около 17% (масс.) среди общей массы загрязнений. Относительное количество загрязнений остальных фракций не превышает 10%. С помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра последовательного анализа установлено, что в состав твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости входит целый ряд химических элементов (в количестве от 1 до 47% (масс.) каждого элемента): железо *Fe*, кремний *Si*, алюминий *Al*, свинец *Pb*, олово *Sn*, цинк *Zn*, кальций *Ca*, магний *Mg*, медь *Cu*.

Присутствие различных химических элементов в составе загрязнений объясняется их наличием в присадках к антифризам, в сталях, чугунах и алюминиевых сплавах, из которых изготовлены отдельные элементы двигателя и его системы охлаждения, а также внесением различных загрязнений извне.

**8.** На основе анализа и обобщения научных данных различных отечественных и зарубежных исследований в области фильтрации жидкостей

дана оценка необходимой и достаточной тонкости фильтрации охлаждающей жидкости двигателя – номинальная тонкость фильтрации (95% улавливания частиц) должна быть  $\geq 100$  мкм.

9. Длительные эксплуатационные испытания разработанных образцов гидроциклонных фильтров-сепараторов показали, что интенсивность образования загрязнений в системе охлаждения может составлять от 0,4 до 3г (в сухом виде) на 1000 км пробега автотранспортного средства. При установке ГФС в систему охлаждения двигателя интенсивность образования загрязнений в ОЖ снижается в 3-4 раза, что свидетельствует об эффективности его применения.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ**

1. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Анализ современного уровня развития технологии и техники фильтрации охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2020. №4. С. 12- 20.
2. Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Физико-химические характеристики твердых частиц загрязнений в охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2021. №3. С. 53-61.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus**

1. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Природа и характеристики загрязнений в системах охлаждения автотранспортных двигателей. – East European Science Journal, 2019, #5(45), part 1. – pp.49-54.
2. Эйдель П.И., Драгомиров М.С., Гамаюнов А.Ю. Перспективный подход к решению проблемы высокоэффективной фильтрации охлаждающей жидкости в автотранспортных двигателях. – East European Science Journal, 2020, #2(54), part 5. – pp.28-34.

### **Патенты на изобретения**

1. Патент РФ на изобретение № 2625891. Гидроциклонное устройство для очистки от твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости поршневых двигателей // Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. – 2017. – 10 с.
2. Патент РФ на изобретение № 2552547. Устройство для очистки потока жидкости от твердых частиц загрязнений // Драгомиров С. Г., Эйдель П.И., Журавлев С. А. – 2015. - 3 с.

### **Другие публикации**

1. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. Высокоэффективная фильтрация охлаждающей жидкости – перспективное направление совершенствования автотранспортных двигателей. – 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сб. трудов Международной н.-т. конф. 31 января 2019. – М.: МАДИ, 2019. – с. 488-501.
2. Драгомиров С.Г., Эйдель П.И., Драгомиров М.С., Гамаюнов А.Ю. Фильтрация охлаждающей жидкости – перспективное направление повышения технического уровня автомобильных и тракторных двигателей. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – с. 271-274.

- 3.** Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Селиванов Н.М. Природа и характер загрязнений в системах охлаждения автотранспортных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 285-288.
- 4.** Драгомиров С.Г., Кулешов И.В., Гамаюнов А.Ю., Драгомиров М.С., Эйдель П.И. Разработка и исследование модуля очистки охлаждающей жидкости с байпасной компоновкой гидроциклонного фильтра-сепаратора для двигателей тяжелой транспортной техники. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 285-288.
- 5.** Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Кулешов И.В. Современные технологии и средства фильтрации охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 285-288.
- 6.** Драгомиров С.Г., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Драгомиров М.С. Физико-химические характеристики твердых частиц загрязнений в охлаждающей жидкости автомобильных и тракторных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 285-288.
- 7.** Эйдель П. И. Лабораторная установка для исследований фильтров охлаждающей жидкости поршневых двигателей /П. И. Эйдель, А. Ю. Гамаюнов, Н. М. Селиванов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 285-288.
- 8.** Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Высокоэффективная фильтрация охлаждающей жидкости – новое перспективное направление совершенствования транспортных двигателей // Разработка и производство двигателей и других агрегатов и систем с применением информационных технологий: сборник. М.: Издат. Дом «Научная библиотека», 2015. С.12-14.
- 9.** Эйдель П.И., Селиванов Н.М. Фильтрация охлаждающей жидкости в автомобильных двигателях. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVI Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2014. – С. 308-312.
- 10.** Эйдель П.И., Селиванов Н.М., Драгомиров М.С., Журавлев С.А. Фильтрация охлаждающей жидкости – перспективное направление повышения технического уровня автомобильных и тракторных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С. 271-274.
- 11.** Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Проблема загрязнения систем жидкостного охлаждения автотракторных двигателей и возможные пути ее решения. // Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве». -

Протвино МО, 2016. – 6 с.

12. Драгомиров М.С., Гамаюнов А.Ю., Эйдель П.И., Селиванов Н.М. Характеристики и природа загрязнений в системах охлаждения автотранспортных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XX Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2018. – С. 272-276.
13. Драгомиров М.С., Гамаюнов А.Ю., Эйдель П.И., Кулешов И.В. Новые подходы к фильтрации охлаждающей жидкости в автотранспортных двигателях. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XXI Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2019. – С. 158-164.
14. Эйдель П.И., Драгомиров М.С., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Природа и характер загрязнений в системах охлаждения автотранспортных двигателей. 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса. // Материалы Международной научно-технической конференции - М: МАДИ, 2019. - с. 515-525.
15. Эйдель П.И., Гамаюнов А. Ю., Драгомиров М. С., Кулешов И.В. Анализ современного уровня развития технологий фильтрации охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей. Журнал Национальной ассоциации ученых. - 2020, №57, 1 ч. – с. 26-31.
16. Гамаюнов А.Ю., Эйдель П.И., Кулешов И.В. Характеристика развития современного уровня технологий фильтрации охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XXII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2020. – С. 122-126.
17. Эйдель П.И. Основные эксплуатационные проблемы систем охлаждения транспортных двигателей. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2016. – С. 119-123.
18. Драгомиров С.Г., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Драгомиров М.С. Эксплуатационное загрязнение систем жидкостного охлаждения автотранспортных двигателей и его негативные последствия. // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2016. – С. 134-136.
19. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. Фильтрация охлаждающей жидкости – перспективное направление совершенствования автомобильных двигателей. Науч.-публ. журн. «Наукоград» - 2016. - №2(8). – с. 30-32.