

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию Эйделя Павла Игоревича**  
**«Совершенствование системы охлаждения автотранспортных**  
**поршневых двигателей путем разработки и применения**  
**гидроциклонного фильтра-сепаратора охлаждающей жидкости»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата технических**  
**наук по специальности 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели»**  
**в диссертационный совет Д.31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ»**

***1. Актуальность диссертационной работы***

Поршневые двигатели внутреннего сгорания различного назначения не теряют своих перспектив, особенно на фоне мирового энергетического кризиса 2021–2022 годов, но для их успешного применения необходимо проведение научно-исследовательских работ по достижению требуемых технико-экономических показателей двигателей. В области автотранспорта, несмотря на развитие силовых установок с электрическим приводом, поршневые двигатели еще длительное время будут оставаться доминирующими.

В последние десятилетия автотранспортные двигатели имеют прогрессирующее развитие. При этом сложность систем, агрегатов и узлов двигателей неизбежно возрастает. В этом плане не является исключением и система жидкостного охлаждения автотранспортных двигателей. Функции этой системы множатся и расширяются настолько, что специалисты корпорации *VAG* даже заменили термин «система охлаждения» на более современный – «система терморегулирования». Современной концепцией системы терморегулирования является адаптивная (интеллектуальная) система, имеющая гамму датчиков и электроисполнительных устройств, связанных с контроллером двигателя. При этом используются жидкостные насосы с электроприводом, терmostаты с электронным управлением, высокоэффективные теплообменники и т. п.

В связи с использованием высоких технологий в современных системах охлаждения двигателей остро встает вопрос о чистоте охлаждающей жидкости и самой системы. Эта сложная проблема загрязнения теплоносителя и системы существует давно, однако, как ни странно, она до последнего времени так и не была решена.

В свете вышеизложенного диссертационная работа Эйделя П. И. обладает **несомненной актуальностью и важностью**. Более того, подобная работа должна была появиться гораздо раньше, поскольку для двигателей автотранспорта загрязнения в системе охлаждения в условиях эксплуатации являются значительным источником потерь времени и средств на техническое обслуживание и ремонт, на замену узлов и агрегатов системы.

## **2. Научная новизна исследования и полученных результатов**

Научную новизну работы составляют следующие основные положения.

1. Выявлены на основе проведенного исследования источники образования и появления загрязнений в системах охлаждения двигателей.
2. Создана и успешно опробована методика предварительного гидравлического расчета гидроциклонного фильтра-сепаратора.
3. Разработан модифицированный принцип гидроцикла для очистки охлаждающей жидкости двигателя, положенный в основу реальной конструкции фильтра-сепаратора.
4. Установлена степень очистки жидкости от загрязнений в зависимости от величины расхода жидкости и размеров твердых частиц загрязнений в гидроциклонном фильтре-сепараторе.
5. Выявлен химический и фракционный состав загрязнений, образующихся в системе охлаждения двигателя, определены его закономерности.
6. Проведена оценка необходимой и достаточной тонкости фильтрации охлаждающей жидкости автотранспортного двигателя.

## **3. Достоверность и обоснованность научных положений и выводов**

При выполнении диссертационного исследования применялись: апробированные методы моделирования процессов течения жидкости и очистки жидкостей от твердых частиц, методы математической статистики, компьютерное моделирование, инженерный эксперимент, химический и фракционный анализ.

Достоверность результатов работы обусловлена выполненным сопоставлением данных теоретических расчетов и экспериментальных исследований при их многократной проверке, устойчивой воспроизводимостью экспериментов при требуемых погрешностях измерений, а также результатами практической эксплуатации созданных гидроциклонных фильтров-сепараторов на двигателях автотранспортной техники. При проведении исследований применялась стандартная и 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 видеоЕндоскоп высокого разрешения *jProbe FX* (Япония) и USB-микроскоп «Микрон-500» (Россия).

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

Наиболее важным результатом данной работы, проверенным в ходе практического использования, является создание инновационного гидроциклонного фильтра-сепаратора (патент РФ на изобретение № 2 625 891), служащего для очистки от твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей. Это техническое решение может применяться и для двигателей других назначений - тракторных, сельскохозяйственной и строительно-дорожной техники, лесотехнических и армейских машин др.

Автор также достиг ценных научно-практических результатов в следующих положениях:

- разработана и успешно опробована комплексная лабораторная установка для исследования разнообразных устройств очистки охлаждающей жидкости;
- созданы опытные образцы гидроциклонных фильтров-сепараторов, успешно прошедшие апробацию в условиях реальной 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);
- выявлены причины загрязнений систем охлаждения автотранспортных двигателей в процессе эксплуатации;
- создана методика предварительного гидравлического расчета гидроциклонного фильтра-сепаратора;
- разработаны и успешно опробованы методики исследования устройств очистки охлаждающей жидкости, а также анализа частиц загрязнений теплоносителя на химический и фракционный состав.

Использование созданного автором работы гидроциклонного устройства для очистки охлаждающей жидкости позволит повысить технический уровень автотранспортных двигателей различного назначения.

### *5. Общий анализ диссертации*

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Тепловые двигатели и энергетические установки» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владimirский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых». 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. Приложения включают 6 Актов использования результатов работы.

**Введение** посвящено краткому изложению сути решаемой в диссертации проблемы, дано обоснование ее актуальности, степень разработанности темы исследования, указаны цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая ценность исследования, обоснована достоверность результатов работы, даны сведения по аprobации диссертации.

**В первой главе** проанализированы проблемы и перспективы систем жидкостного охлаждения автотранспортных двигателей. Отмечено, что высокие энергетические, экологические и другие показатели современных автотранспортных двигателей были бы недостижимы без высокоэффективных систем охлаждения.

Дан анализ статистических данных по неисправностям и отказам элементов систем жидкостного охлаждения двигателей, рассмотрены типичные неисправности, связанные с загрязнением охлаждающей жидкости. Сделан вывод о том, что абсолютное большинство отказов и неисправностей систем охлаждения в той или иной мере связано с загрязнением как

охлаждающей жидкости, так и системы охлаждения в целом.

В этой же главе автором рассмотрены физико-химические процессы образования загрязнений в системе охлаждения, выявлены источники появления этих загрязнений. Проанализированы принципы действия и конструкции существующих фильтров охлаждающей жидкости, выявлены их принципиальные недостатки.

На основе обширных материалов первой главы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** содержит обоснование основных требований к перспективному устройству очистки охлаждающей жидкости и оценку необходимой и достаточной тонкости фильтрации (очистки) охлаждающей жидкости современных двигателей.

Кроме этого, выполнен анализ существующих принципов и конструкций устройств для очистки жидкостей с целью обоснования использования гидроциклонного принципа действия разрабатываемого устройства очистки жидкости. Приведен подробный патентный анализ фильтров охлаждающей жидкости, выпускаемых различными зарубежными фирмами (в РФ подобные устройства не выпускаются). Детально описана конструкция создаваемого устройства для гидроциклонной очистки охлаждающей жидкости. Приведены его конкурентные преимущества и указаны особенности функционирования.

**В третьей главе** приведены результаты компьютерного моделирования работы гидроциклонного фильтра-сепаратора для очистки охлаждающей жидкости и показана гидродинамическая картина течений в проточной части гидроциклонного устройства. На базе этого проведен выбор его рациональных конструктивных параметров и приведена оценка эффективности функционирования.

Расчет гидроциклонного фильтра-сепаратора производился в программно-вычислительном комплексе *Solid Works Flow Simulation (SWFS)*, который предназначен для газо- и гидродинамического расчетного анализа.

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

При моделировании турбулентных течений уравнения Навье-Стокса усреднялись по Рейнольдсу, т. е. использовалось усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных по малому масштабу времени составляющих параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитывались соответствующими производными по времени.

По результатам выполненных расчетов с последующей экспериментальной проверкой были подобраны рациональные геометрические параметры гидроциклонного устройства, обеспечивающие его работоспособность с приемлемыми рабочими показателями. Данные расчетные исследования гидроциклонного фильтра-сепаратора явились основой для разработки методики предварительного гидравлического расчета таких устройств.

Задача оптимизации конструкции фильтра-сепаратора на данном этапе работ автором не ставилась.

На основе компьютерной модели гидроциклонного фильтра-сепаратора было выполнено расчетное исследование улавливающей способности

разработанного устройства на режиме 70 л/мин. с использованием тестовых частиц размерами 110, 250, 450 мкм.

Проведенные теоретические исследования позволили автору более обоснованно подойти к созданию конструкции гидроциклонного фильтра-сепаратора.

**В четвертой главе** приведены методики и представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований созданных макетных, опытных и серийных образцов фильтров-сепараторов. Также в этой главе даны результаты лабораторных исследований зарубежных образцов фильтров охлаждающей жидкости.

В этой главе автором подробно описана созданная им лабораторная установка для исследования устройств очистки различных конструкций. Приведены методики исследования гидроциклонных устройств очистки и выпускаемых промышленностью фильтров охлаждающей жидкости.

Результаты проведенных автором исследований представлены в виде характеристик гидравлического сопротивления различных устройств, а также в виде таблиц и графиков, иллюстрирующих изменение улавливающей способности гидроциклонных устройств в зависимости от размера тестовых частиц и гидравлических режимов работы этих устройств.

**Пятая глава** диссертации является одной из наиболее больших по объему и интересной по содержанию. В ней изложены следующие результаты исследования:

- показана реальная картины загрязнений систем охлаждения двигателей в процессе эксплуатации автотранспортных средств;
- даны результаты испытаний разработанных опытных/серийных образцов гидроциклонных фильтров-сепараторов в условиях эксплуатации и приведен анализ полученных результатов;
- представлен химический и фракционный состав загрязнений охлаждающей жидкости, полученных в условиях реальной эксплуатации;
- обобщение анализа гидравлической совместимости разработанного гидроциклонного фильтра-сепаратора с системой охлаждения двигателя.

Материал этой главы хорошо иллюстрирован оригинальными фото, сделанными самим автором.

В процессе проведенных исследований в охлаждающей жидкости были выявлены: значительные образования накипи, продукты химической коррозии и кавитационной эрозии элементов системы охлаждения, фрагменты разрушившихся уплотнительных элементов, продукты разложения антифриза (гели) и отработанных присадок, значительное количество песка, грязи, силиконовых герметиков, масляные и жировые отложения.

На основе результатов анализа состава загрязнений автор отмечает, 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 образцов гидроциклонных фильтров-сепараторов, проведенные автором в течение 1,5

лет, позволили установить, что интенсивность образования загрязнений в системе охлаждения может составлять от 0,4 до 3 г (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.

## *6. Замечания по содержанию материала диссертации и автореферата*

При общем, бесспорно, положительном впечатлении от материалов диссертации и автореферата, нельзя не сделать и некоторые замечания по содержанию диссертации.

1. При оценке необходимой и достаточной тонкости фильтрации (очистки) охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей необходимо было бы использовать больше фактического материала. Кроме этого, установленная автором необходимая и достаточная тонкость очистки охлаждающей жидкости 100 мкм не учитывает возможную опасность слипания и коагуляции более мелких частиц загрязнений (менее 100 мкм) с образованием твердых загрязнений больших размеров.

2. На рис. 5.48 диссертации (с. 154) и рис. 19 автореферата (с. 21) представлены кривые изменения удельного количества загрязнений, уловленных опытными фильтрами в зависимости от пробега  $L$  городских автобусов. Не проведен анализ этой зависимости. Неясно, почему уменьшается количество загрязнений с увеличением пробега автобусов. В диссертации и в автореферате указано, что фактические (опытные) точки для этого графика получались через 40–50 тыс. км пробега автобусов. Однако на указанном графике несколько точек имеют интервал до 100 тыс. км пробега.

3. В расчетных моделях (глава 3) автор использовал упрощенную конструкцию гидроциклонного фильтра-сепаратора. В дальнейшем, как видно по результатам эксплуатационных испытаний (глава 5), конструкция фильтра-сепаратора претерпела изменения. Возникает вопрос: не повлияло ли это изменение конструкции последующих вариантов гидроциклонных фильтров-сепараторов на достоверность расчетов, выполненных в 3-й главе?

4. В расчетах автор использовал в качестве рабочей жидкости воду с температурой 493 К, почему не антифриз с рабочей температурой в системе охлаждения двигателя?

5. При моделировании сепарационных процессов (рис. 2.13) с использованием частиц размером 250 и 450 мкм получены хорошие результаты (погрешность между расчетом и экспериментом не превышает 1%). Однако при использовании частиц малого размера (110 мкм) возникла большая погрешность. Желательно было бы проанализировать с чем это связано.

6. Автор не везде в диссертации дает метрологические характеристики используемых приборов и оборудования.

## *7. Общая оценка работы*

С учетом материалов, представленных в диссертации и автореферате, можно констатировать, что работа оформлена в соответствии с существующими требованиями ВАК РФ и изложена технически грамотным

языком. Автореферат диссертации и опубликованные автором материалы в полной мере отражают содержание диссертации.

Указанные выше замечания имеют больше технический, а не концептуальный характер, и не затрагивают основного существа диссертации, достоверности ее выводов, актуальности, научной новизны и практической значимости выполненной работы.

Представленная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей научно обоснованные теоретические и прикладные результаты, совокупность которых вносит существенный вклад в решение проблемы очистки охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей в процессе их эксплуатации. Диссертация отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. (№ 842, с изменениями), а ее автор – Эйдель Павел Игоревич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели».

**Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
Галышев Юрий Виталиевич  
10 ноября 2023 г.**



Диссертация доктора технических наук защищена по специальности 05.04.02  
– Тепловые двигатели.

Место работы и должность: профессор высшей школы энергетического машиностроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)  
Адрес организации: Россия, 195251, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, дом 29

Сайт: <https://www.spbstu.ru/>

Сайт: <https://www.spbstu.ru/>  
Телефон +7 (812) 297-20-95

E-mail: office@spbstu.ru

